



**Luís Manuel Palma**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Produção de Misturas Betuminosas a Quente com Incorporação de Material Fresado**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Rui Micaelo, Professor Auxiliar, FCT-UNL  
Co-orientador: Luís Quaresma, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Rocha de Almeida

Arguente: Doutora Ana Cristina Freire

Vogal: Prof. Doutor Luís Quaresma



**Março 2015**



**LOMBADA**



**Produção de Misturas Betuminosas a Quente com Incorporação de Material Fresado**

**Luís Palma**

**2015**





*Copyright* Luís Manuel Palma, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologias e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

A concretização do presente trabalho não seria possível sem a colaboração e acompanhamento de algumas pessoas e instituições, aos quais gostaria de apresentar o meu sincero agradecimento.

Começo por agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, instituição que me formou me proporcionou uma aprendizagem exímia.

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Micaelo, e co-orientador, Professor Doutor Luís Quaresma, por toda a informação e conhecimento transmitidos, apoio e disponibilidade demonstrados no decorrer deste trabalho.

À empresa *Tecnovia – Sociedade de Empreitadas S.A.*, por todo o material cedido, instalações e equipamentos disponibilizados, sem os quais não teria sido possível a realização deste estudo laboratorial. Ao Eng.º António Simões e Eng.º Filipe Gameiro, por me terem aberto esta oportunidade na empresa. Um agradecimento especial ao Eng.º Nuno Fernandes, pela sua orientação e conhecimento, acompanhamento e disponibilidade, atenção e preocupação constante e, ao Paulo Bairrada, pela sua colaboração e apoio, bem como boa vontade e amizade demonstradas. Ao Tiago Romanga e ao Telmo Piedade, pelo seu auxílio laboratorial.

Um enorme e sincero agradecimento aos meus pais e avós, pelo seu apoio e paciência, carinho e preocupação ao longo da minha formação académica, por me terem proporcionado oportunidades para tal e gosto de continuar a crescer a nível pessoal e profissional.

Aos meus amigos, pela sua amizade, apoio e motivação. Obrigado pelos momentos de convívio e diversão, que me incentivaram ainda mais a conclusão desta fase da minha vida.

Por último, e não menos importante, à Marta Simões por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, bons e menos bons. Obrigado pelo apoio e incentivo incondicional, pelo afecto e carinho sempre presentes, fazendo-me acreditar que era possível.



## RESUMO

A incorporação de materiais reciclados na construção de estradas, como substituição de materiais virgens é percebida como uma oportunidade de economizar recursos, e evitar o impacto associado à sua extração e transporte. Desta forma, a incorporação de material fresado (do termo inglês *RAP - Reclaimed Asphalt Pavement*) em misturas betuminosas produzidas a quente em central tem sido uma alternativa satisfatória.

Neste trabalho, foram estudadas três misturas betuminosas do tipo macadame betuminoso (AC 20 base 35/50), tradicional e com taxas de incorporação de RAP de 10% e 20%, com o objetivo de efetuar uma análise comparativa do seu comportamento. Começou-se por realizar um estudo Marshall de forma a determinar a percentagem ótima de betume a usar em cada mistura e, posteriormente, a composição foi transposta para central para o seu fabrico. No final foram realizados ensaios de caracterização mecânica sobre as misturas para avaliar o seu desempenho, através de ensaios de sensibilidade à água, módulo de rigidez, resistência à fadiga e à deformação permanente.

Esta dissertação teve o apoio da empresa Tecnovia – Sociedade de Empreitadas S.A., com a disponibilização de instalações e materiais para o trabalho experimental.

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que as misturas recicladas apresentaram um comportamento satisfatório, quando comparado com as misturas tradicionais.

### PALAVRAS-CHAVE:

Reciclagem a quente

Material fresado

Métodos de formulação de misturas betuminosas recicladas

Caracterização mecânica



## **ABSTRACT**

The incorporation of recycled materials in road construction as a substitution for virgin materials is perceived as an opportunity to save resources and avoid the impact associated with their extraction and transportation. This way, the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in hot mix asphalt applications has been a satisfactory alternative.

In this work three bituminous mixtures, a traditional one, AC 20 base 35/50 (MB), and two others with RAP incorporation rates of 10% and 20% were studied, in order to perform a comparative analysis of their behavior. Initially a Marshall study was performed to determine the optimal percentage of bitumen to be used in each mixture. The composition was subsequently transposed to batch plant for its production. At the end, mechanical characterization was performed on mixtures to evaluate their performance through tests of sensibility to water, stiffness modulus, fatigue resistance and rutting resistance.

This work had the support of the company Tecnovia – Sociedade de Empreitadas S.A., with the provision of facilities and materials for experimental work.

According to the results obtained, is possible to conclude that the recycled mixtures showed a good performance when compared with traditional bituminous blends.

### KEY-WORDS:

Hot recycling

Reclaimed asphalt

Recycled asphalt mixtures design

Mechanical characterization





## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento Temático.....	1
1.2 Objectivos e Metodologia do Trabalho.....	3
1.3 Estrutura.....	4
2. ESTADO DA ARTE: Misturas Betuminosas Recicladas a Quente .....	7
2.1 Reciclagem de pavimentos rodoviários .....	7
2.2 Reciclagem a quente em central.....	9
2.3 Obtenção, Armazenamento, Aplicação em Obra e Requisitos Mínimos.....	13
2.4 Materiais constituintes: o betume.....	18
2.4.1 Origem.....	18
2.4.2 Composição e Constituição .....	19
2.4.3 Envelhecimento.....	20
2.4.4 Relação fíler/betume (f/b) .....	23
2.5 Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas .....	25
2.5.1 Considerações Gerais .....	25
2.5.2 Composição das Misturas Betuminosas Recicladas.....	26
2.5.3 Método do Asphalt Institute (AI) .....	27
2.5.4 Método <i>Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave)</i> .....	30
2.5.5 Método baseado nas normas europeias: <i>EN 13108</i> .....	36
3. Programa Experimental.....	41
3.1 Considerações Gerais .....	41
3.2 Caso de estudo .....	41
3.3 Caracterização dos materiais constituintes .....	44
3.3.1 Caracterização dos agregados novos .....	44
3.3.2 Caracterização do material fresado .....	45
3.4 Betume novo a usar na mistura betuminosa .....	50
3.5 Formulação da mistura betuminosa .....	52
3.5.1 Composição granulométrica da mistura .....	52
3.5.2 Caracterização geométrica, física e mecânica da mistura de agregados.....	53
3.5.3 Estudo Marshall.....	53
3.6 Caracterização do desempenho das misturas betuminosas.....	59
3.6.1 Preparação dos provetes.....	59
3.6.2 Ensaio de sensibilidade à água.....	61

3.6.3 Ensaio de resistência à fadiga e rigidez .....	63
3.6.4 Ensaio de resistência à deformação permanente .....	69
4. Apresentação e Discussão de Resultados .....	71
4.1 Caracterização dos materiais constituintes .....	71
4.1.1 Caracterização dos agregados novos .....	71
4.1.2 Caracterização do material fresado .....	72
4.2 Betume a usar na mistura betuminosa .....	75
4.3 Formulação da mistura betuminosa .....	76
4.4 Caracterização geométrica, física e mecânica sobre a mistura de agregados.....	78
4.5 Ensaio Marshall .....	79
4.6 Caracterização do desempenho das misturas betuminosas.....	85
4.6.1 Sensibilidade à água .....	85
4.6.2 Resistência à Fadiga e Rigidez .....	88
4.6.3 Resistência à deformação permanente .....	95
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.1 Conclusões.....	99
5.2 Desenvolvimentos Futuros.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	103
REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	109
ANEXOS .....	113
→ Anexo A: Historial do material fresado armazenado nas instalações da empresa em Viseu, referente aos anos 2008-2014. ....	115
→ Anexo B: Declarações de desempenho dos agregados e betumes.....	119
→ Anexo C: Granulometria dos agregados constituintes das misturas betuminosas e do material fresado. ....	127
→ Anexo D: Cálculo das curvas granulométricas finais das misturas betuminosas.....	129
→ Anexo E: Resultados dos estudos Marshall das misturas betuminosas.....	131
→ Anexo F: Resultados dos módulos de rigidez. ....	137
→ Anexo G: Resultados do ensaio de resistência à fadiga. ....	139
→ Anexo H: Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente.....	141

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Técnicas de reabilitação e reciclagem de pavimentos (adaptado de Moreira & Pereira, 2007).....	8
Figura 2.2 - Esquema do processo de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006). ....	11
Figura 2.3 - Exemplo de uma central contínua móvel de fabrico de misturas betuminosas a quente [Marini-Ermont, 2014].....	12
Figura 2.4 - Esquema de uma central betuminosa contínua a quente (Baptista, 2006).....	12
Figura 2.5 - Esquema das entradas do material fresado no tambor de uma central contínua (Ibarra, 2003 adaptado em Branco et al, 2011). ....	13
Figura 2.6 - Fresagem de camadas de pavimento (Wirtgen, 2014). ....	14
Figura 2.7 - Esquema do processo de britagem para obtenção do material fresado (Ibarra, 2003 adaptado em Baptista, 2006). ....	14
Figura 2.8 - Esquema de armazenamento de material fresado (Baptista, 2006). ....	15
Figura 2.9 - Esquema de colocação de uma mistura betuminosa a quente em obra (Wirtgen, 2014). ....	15
Figura 2.10 - (a) Pavimentadora, (b) esquema dos componentes principais de uma pavimentadora (1-tremonha recetora, 2- transportadores, 3- comportas reguláveis, 4- mesa vibratória) (Dynapac, 2007) .....	16
Figura 2.11 - Compactadores de misturas betuminosas: a) cilindro de rolos , b) cilindro de pneus (Dynapac, 2007).....	16
Figura 2.12 - Diagrama de produção do betume (Branco et al, 2011).....	19
Figura 2.13 - Composição química do betume.....	20
Figura 2.14 - Envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Whiteoak,1990)..	22
Figura 2.15 - Envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Whiteoak, 1990). 22	
Figura 2.16 - Diagrama esquemático ilustrando a ocupação dos vazios do filer pelo betume (Quaresma, 2002).....	24
Figura 2.17 - Composição de uma mistura reciclada (adaptado de (Aravind e Das, 2007)).....	26
Figura 2.18 - Organograma para formulação de misturas betuminosas a quente (adaptado de (Asphalt Institute, 1986)) .....	28
Figura 2.19 - Determinação da viscosidade requerida para o betume novo ou aditivo a adicionar (Lima, 2003).....	29
Figura 2.20 - Esquema de ensaios seguido na caracterização do betume pela metodologia Superpave (Bento, 2010).....	32
Figura 2.21 - Gráfico 1 de temperatura (alta) (Temperature Blending Charts) (Kandhall & Foo, 1997). ....	33
Figura 2.22 - Gráfico 2 de temperatura (alta) (Temperature Blending Charts) (Kandhall & Foo, 1997). ....	33
Figura 2.23 - Representação gráfica da obtenção das temperaturas críticas do betume novo (Tv ou Tcn) em função da taxa de reciclagem e das temperaturas críticas do ligante do fresado (Tf ou Tcf) e do ligante final (Tm ou Tcr). ....	34
Figura 2.24 - Representação gráfica da obtenção da TR em função das temperaturas críticas do betume novo (Tv ou Tcn), do ligante do fresado (Tf ou Tcf) e do ligante final (Tm ou Tcr) .....	35
Figura 2.25 - Organograma da metodologia adoptada para formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Baptista, 2006). ....	37

Figura 2.26 - Representação gráfica da variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem de betume com que foram fabricados pelo Método de Marshall (Branco et al, 2011).....	38
--	----

Figura 3. 1 - Fluxograma dos trabalhos experimentais.....	42
Figura 3. 2 - Central de produção de misturas betuminosas da empresa, em Évora. ....	44
Figura 3. 3 - Recuperação do betume: (a) centrífugadora; (b) colocação do filtro e material fresado na centrífugadora; (c) lavagem do material fresado com tolueno (d) parte líquida resultante da lavagem (tolueno+betume). ....	47
Figura 3. 4 - Evaporador rotativo. ....	48
Figura 3. 5 - Ensaio de granulometria ao material fresado. ....	48
Figura 3. 6 - Preparação das misturas betuminosas com diferentes percentagens de betume para determinação da percentagem óptima. (a) pré-aquecimento dos materiais e utensílios; (b) mistura dos componentes da mistura. ....	54
Figura 3. 7 - Preparação de provetes para o estudo Marshall. (a) enchimento dos moldes; (b) compactador de impacto; (c) nº de pancadas de ensaio; (d) desmolde dos provetes; (e) altura dos provetes; (f) diâmetro dos provetes.....	55
Figura 3. 8 - Provetes para o estudo Marshall: (a) MB1; (b) MB2; (c) MB3. ....	55
Figura 3. 9 - Compactador de rolo.....	60
Figura 3. 10 - Preparação dos provetes para os ensaios de desempenho: (a) enchimento do molde para compactação; (b) compactação da mistura betuminosa; (c) desmoldagem das placas; (d) serragem das placas; (e) provetes prismáticos (vigas); (f) acondicionamento dos provetes .....	61
Figura 3. 11 - Equipamento de ensaio de flexão apoiada em 4 pontos (4PB-PR).....	64
Figura 3. 12 - Esquema de ensaio à fadiga por flexão em quatro pontos (Teixeira, 2000).....	65
Figura 3. 13 - Esquema dos esforços do ensaio à fadiga por flexão em quatro pontos. ....	65
Figura 3. 14 - Definição da rotura em ensaios de flexão com extensão controlada (Pais e Palha,2000).....	66
Figura 3. 15 - Evolução típica da tensão e extensão controladas em ensaios de fadiga (Baptista, 2006). ....	66
Figura 3. 16 - Resultados dos ensaios de fadiga expressos em leis de fadiga (Baptista, 2006). .	69
Figura 3. 17 - Equipamento para ensaio de pista – small size device. ....	69
Figura 3. 18 - Evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (Gardete, 2006). ....	70

Figura 4.1 - Agregados novos. ....	71
Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados britados novos componentes da mistura betuminosa. ....	72
Figura 4.3 - Material fresado.....	73
Figura 4.4 - Amostra de material fresado incinerada. ....	73
Figura 4.5 - Curva granulométrica do material fresado. ....	74
Figura 4. 6 - Caracterização do betume: (a) penetração no betume (b) temperatura de amolecimento do betume.....	75

Figura 4.7 - Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso definido (MB1). .....	77
Figura 4.8 - Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso definido (MB2). .....	77
Figura 4.9 - Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso definido (MB3). .....	78
Figura 4.10 - Gráficos ilustrativos da variação, com a percentagem de betume, das principais propriedades determinadas no âmbito do estudo Marshall (MB1). .....	81
Figura 4.11 - Gráficos ilustrativos da variação, com a percentagem de betume, das principais propriedades determinadas no âmbito do estudo Marshall (MB2). .....	82
Figura 4.12 - Gráficos ilustrativos da variação, com a percentagem de betume, das principais propriedades determinadas no âmbito do estudo Marshall (MB3). .....	82
Figura 4.13 - Resultados de ITSr e IRC das misturas betuminosas. ....	87
Figura 4.14 - Provete prismático usado nos ensaios de determinação do módulo de rigidez e resistência à fadiga. ....	89
Figura 4.15 - Resultados obtidos para o módulo de rigidez de cada provete. ....	91
Figura 4.16 - Resultado da média do módulo de rigidez de cada mistura. ....	92
Figura 4.17 - Relação do ângulo de fase com o módulo de rigidez das misturas estudadas. ....	93
Figura 4.18 - Representação gráfica da lei de fadiga de cada mistura betuminosa. ....	94
Figura 4.19 – Exemplo de uma placa usada no ensaio de pista. ....	95
Figura 4.20 - Representação gráfica do desenvolvimento das rodeiras. ....	96
Figura 4.21 - Representação gráfica do desenvolvimento das rodeiras, considerando a placa extra da mistura MB2. ....	97



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Dados estatísticos da reciclagem na Europa (EAPA, 2012).....	10
Quadro 2.2 - Propriedades e requisitos mínimos de conformidade das misturas betuminosas recuperadas (LNEC E472, 2009). ....	17
Quadro 2.3 - Campo de aplicação e taxas máximas de incorporação de misturas betuminosas recuperadas no fabrico de misturas recicladas a quente (LNEC E472, 2009).....	18
Quadro 2.4 - Temperaturas para seleção do ligante betuminoso (Khandall & Foo, 1997). ....	32
Quadro 3.1 - Nomenclatura das misturas betuminosas estudadas.....	43
Quadro 3.2 - Características da central de produção de misturas betuminosas da empresa. ....	43
Quadro 3.3 - Penetração e temperatura de amolecimento da amostra de betume virgem 35/50. ....	51
Quadro 3.4 - Penetração e temperatura de amolecimento da amostra de betume virgem 50/70. ....	51
Quadro 3.5 - Fuso granulométrico (numérico) da mistura AC 20 base (MB) definido no CEEP. 53	
Quadro 4.1 - Designação granulométrica, proveniência e natureza geológica dos agregados novos. ....	71
Quadro 4.2 - Características do betume recuperado do material fresado.....	75
Quadro 4.3 - Percentagem de cada agregado a incorporar na mistura betuminosa. ....	76
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios geométricos, físicos e mecânicos (MB1). ....	78
Quadro 4.5 - Resultados do cálculo das percentagens de betumes. ....	79
Quadro 4.6 - Resumo dos resultados do estudo Marshall (MB1). ....	80
Quadro 4.7 - Resumo dos resultados do estudo Marshall (MB2). ....	80
Quadro 4.8 - Resumo dos resultados do estudo Marshall (MB3). ....	81
Quadro 4.9 - Percentagem ótima de betume para as misturas betuminosas estudadas. ....	83
Quadro 4.10 - Características obtidas do estudo Marshall para as percentagens ótimas de betume. ....	83
Quadro 4.11 - Fórmulas de trabalho das misturas betuminosas.....	84
Quadro 4.12 - Transposição das fórmulas de trabalho para central. ....	84
Quadro 4.13 - Características das misturas betuminosas estudadas depois de produzidas em central. ....	85
Quadro 4.14 - Características volumétricas dos provetes ao ensaio ITSr. ....	86
Quadro 4.15 - Resultados de ensaio ITSr. ....	86
Quadro 4.16 - Resultados de ensaio IRC. ....	87
Quadro 4.17 - Características volumétricas dos provetes para ensaio de resistência à fadiga e módulo de rigidez (MB1). ....	89
Quadro 4.18 - Características volumétricas dos provetes para ensaio de resistência à fadiga e módulo de rigidez (MB2). ....	90
Quadro 4.19 - Características volumétricas dos provetes para ensaio de resistência à fadiga e módulo de rigidez (MB3). ....	90
Quadro 4.20 - Módulos de rigidez de cada mistura betuminosa medidos a 5Hz, 10Hz e 20Hz. 93	

Quadro 4.21 - Coeficientes das leis de fadiga das misturas e respectivos parâmetros $\varepsilon_4$ , $\varepsilon_5$ e $\varepsilon_6$ . .....	94
Quadro 4.22 - Características volumétricas dos provetes sujeitos ao ensaio de pista.....	95
Quadro 4.23 - Resultados médios do ensaio de pista.....	96
Quadro 4.24 - Características e resultados de ensaio da placa extra (MB2). ....	97



## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

### SÍMBOLOS:

$c$  – Fator corretivo a aplicar à altura dos provetes

$E$  – Módulo de rigidez

$G^*$  – Módulo de corte complexo

$P_b$  – Percentagem de betume

$P_{bn}$  – Percentagem de betume novo

$P_{bmf}$  – Percentagem de betume do material fresado

$Pen_{mix}$  – Penetração do ligante da mistura contendo material fresado

$N$  – Vida à fadiga (ciclos)

$M_b$  – Massa do ligante

$S_m$  – Estabilidade Marshall dos provetes molhados

$S_s$  – Estabilidade Marshall dos provetes secos

$T_{mix}$  – Temperatura de amolecimento do ligante na mistura contendo material fresado

$T_f$  – Temperatura crítica do ligante do fresado

$T_m$  – Temperatura crítica da mistura de ligantes desejada

$T_v$  – Temperatura crítica do betume virgem

$TR$  – Taxa de reciclagem

$V_m$  – Porosidade

$WA_{24}$  – Absorção de água.

$\gamma_b$  – Peso específico do betume

$\delta$  – Ângulo de fase

$\Delta T_{ab}$  – Variação da temperatura de amolecimento anel e bola em relação ao betume que o originou

$\varepsilon$  – Amplitude da extensão de tração inicial

$\varepsilon_4$  – Extensão de tração necessária para que haja rotura do material ao fim de 10.000 de ciclos de carga

$\varepsilon_5$  – Extensão de tração necessária para que haja rotura do material ao fim de 100.000 de ciclos de carga

$\varepsilon_6$  – Extensão de tração necessária para que haja rotura do material ao fim de 1.000.000 de ciclos de carga

$\eta_0$  – Viscosidade inicial do ligante a 25°C

$\eta_r$  – Viscosidade do ligante recuperado

$v$  – Volume de vazios do fíler seco compactado (índice de vazios de Rigden)

$\rho_a$  – Massa volúmica do material impermeável das partículas

$\rho_{b,dim}$  – Baridade geométrica

$\rho_{mv}$  – Baridade máxima teórica

$\rho_{rd}$  – Massa volúmica do material impermeável das partículas secas em estufa

$\rho_{SSD}$  – Massa volúmica do material saturado com superfície seca

$\rho_w$  – Massa volúmica da água

SIGLAS:

AC – *Asphalt Concrete* (Betão Betuminoso)

AI – *Asphalt Institute*

BBR – *Bending Beam Rheometer*

BRRC – *Belgian Road Research Centre* (Centro de Investigação Rodoviário Belga)

CEEP – Caderno de Encargos das Estradas de Portugal

CKE – *California Kerosene Equivalent*

DSR – *Dynamic Shear Rheometer*

EAPA – *European Asphalt Pavement Association* (Associação Europeia de Pavimentos Betuminosos)

EN – *European Norm* (Norma Europeia)

HMA – *Hot Mix Asphalt* (Mistura Betuminosa a Quente)

IRC – Índice de Resistência Conservada

ITSd – *Indirect Tensile Strength of Dry Group* (Resistência à Tração Indirecta do grupo secos)

ITSR – *Indirect Tensile Strength Ratio* (Resistência à Tração Indirecta)

ITSw – *Indirect Tensile Strength of Wet Group* (Resistência à Tração Indirecta do grupo molhados)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MBR – Mistura Betuminosa Recuperada

MF – Material Fresado

MR – Material Recuperado

PAV – *Pressure Aging Vessel*

PG – *Performance Grade*

PRN2000 – Plano Rodoviário Nacional de 2000

rpm – Rotações por minuto

RAP – *Recycled Asphalt Pavement*

RD<sub>AIR</sub> – *Mean rut depth in air* (Profundidade da rodeira)

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

Superpave – *SUperior PERforming asphalt PAVements*

VMA – *Voids in Mineral Aggregates* (Volume da vazios do agregado)

WTT – *Wheel Tracking Test* (Ensaio de Pista)

WTS<sub>AIR</sub> – *Wheel Tracking Slope* (Taxa de Deformação no Ensaio de Pista ao Ar)

4PB-PR – *4-point bending test to prismatic species* (Ensaio de Flexão a Peças Prismáticas apoiadas em quatro pontos)

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Enquadramento Temático**

O desenvolvimento e a necessidade de melhorar o desempenho das vias de comunicação fazem parte integrante do progresso de qualquer país. Em Portugal, a rede rodoviária assume um papel fundamental, pois constitui o principal meio de comunicação que assegura a ligação entre centros urbanos e rurais e contribui para a correção de assimetrias que se verificam no progresso socioeconómico do país (PRN, 2000).

As estradas são infra-estruturas expostas a um aumento do volume de tráfego e correspondentes cargas. A necessidade de reabilitar pavimentos surge assim como crucial, sendo a mesma consequência da ocorrência de degradações, que podem afetar a qualidade dos pavimentos em termos quer funcionais quer estruturais (Cunha, 2010).

Os pavimentos rodoviários que constituem a rede rodoviária de acordo com o seu funcionamento estrutural e materiais constituintes classificam-se em pavimentos flexíveis, pavimentos semi-rígidos e pavimentos rígidos, sendo que uma grande parte da rede rodoviária portuguesa é constituída por pavimentos flexíveis (Branco et al, 2011).

Nos últimos anos em Portugal tem-se verificado um crescimento na construção, conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários (Freitas & Pereira, 2001).

Atualmente, estima-se que 90% dos pavimentos na Europa sejam constituídos por materiais betuminosos. A produção de misturas betuminosas pode ser realizada a quente ou a frio, em centrais fixas ou móveis (EAPA, 1998).

As misturas betuminosas produzidas a quente contêm agregados selecionados, em conjunto com fíler e/ou aditivos e betume aquecidos, sendo que diferentes temperaturas afetam a capacidade de revestimento e a compactabilidade devido às características termoplásticas do betume. As propriedades mecânicas destas misturas dependem das quantidades destes componentes e das suas características, e a composição de uma mistura betuminosa é normalmente estabelecida com base num estudo de formulação, através do qual se definem os componentes a utilizar na mistura e as suas proporções de acordo com as especificações dos cadernos de encargos (EAPA, 1998).

As misturas betuminosas fabricadas a quente são utilizadas na construção e conservação de pavimentos flexíveis como camadas de desgaste, ligação ou regularização e de base. Em

Portugal, neste tipo de misturas utilizam-se betumes asfálticos, cujas propriedades se adaptam às necessidades inerentes a cada tipo de mistura, às condições climáticas e aos tipos de pavimento em que esta é aplicada, é comum o uso de betumes de classe de penetração 35/50 ou 50/70 para misturas tradicionais (Cepsa, 2007).

Ao longo das duas últimas décadas, a produção e aplicação de misturas asfálticas têm vindo a melhorar, especialmente para alcançar objetivos económicos e ambientais. Presentemente, esta melhoria tem sido centrada na redução do consumo de energia durante todo o processo, sem alterar o desempenho mecânico destas misturas asfálticas (Capitão et al, 2012).

Atualmente a manutenção das qualidades funcionais e estruturais dos pavimentos rodoviários, requer cada vez mais o desenvolvimento de ações de conservação e reabilitação. Tal deve-se não só ao facto de diversas infraestruturas rodoviárias atingirem o término do seu período de dimensionamento (tradicionalmente 10 a 20 anos) mas também ao aumento do tráfego pesado e da carga transportada desde a década de 1990 em toda a União Europeia (Baptista, 2006).

Deste modo, uma das estratégias para assegurar um crescimento sustentável de uma sociedade é a reciclagem, a reutilização e a redução do aproveitamento de recursos naturais existentes (Fonseca, 2010).

Sendo parte importante da constituição de um pavimento, as misturas betuminosas e os correspondentes materiais constituintes virgens, como o betume derivado do petróleo, são materiais cujo consumo interessa diminuir, do ponto de vista não só ambiental mas também económico. Nesta perspectiva tem sido desenvolvida investigação no sentido de incorporar material proveniente de camadas betuminosas de pavimentos degradados (RAP) em misturas deste tipo (Su et al, 2009; Pradyumna et al, 2013).

A reciclagem de pavimentos surge com maior predominância na década de 70 nos Estados Unidos da América, numa altura em que a cotação do petróleo registava valores muito elevados, traduzindo-se em custos muito elevados de fabrico, transporte e aplicação de misturas betuminosas. Na década de 90 volta a ter um papel importante devido principalmente a fatores de ordem ambiental e, a partir desta altura, estes fatores assumem maior relevância na escolha do processo de reabilitação de um pavimento (Batista, 2004).

A reciclagem de misturas betuminosas a quente em central constitui uma técnica de reabilitação de pavimentos onde se reutilizam os materiais provenientes da fresagem dos

pavimentos degradados na construção de novas camadas, protagonizando a situação ótima do ponto de vista ambiental uma vez que se reutilizam materiais considerados como resíduos podendo conferir-lhes o mesmo valor técnico e económico das misturas betuminosas originais (Gomes et al 2006; Bento, 2010; Baptista et al, 2011).

O trabalho desenvolvido utilizou uma metodologia usual (Baptista, 2006), incluindo a caracterização de desempenho de misturas betuminosas recicladas a quente com incorporação de fresados com particular enfoque nas misturas contínuas dada a sua prevalência no nosso país.

## **1.2 Objectivos e Metodologia do Trabalho**

Apesar da reciclagem a quente ser uma técnica com alguns anos de aplicação e os trabalhos desenvolvidos nesta área permitirem alegar conhecimento sobre a utilização de material fresado, continua a existir a necessidade de aumentar o conhecimento sobre o tema.

Deste modo, esta dissertação tem como objetivo contribuir para a avaliação do comportamento em serviço de misturas betuminosas, produzidas a quente em central contínua com betume asfáltico e incorporação de material fresado, através das propriedades de sensibilidade à água, módulo de rigidez, resistência à fadiga e deformação permanente.

No presente trabalho, a técnica de reabilitação estudada foi o aproveitamento de material proveniente da desagregação de pavimentos betuminosos por fresagem e/ou demolição de placas existentes, com posterior incorporação em novas misturas betuminosas produzidas a quente em central, de forma a otimizar a gestão de materiais e prolongar o seu ciclo de vida criando condições de sustentabilidade na pavimentação rodoviária.

O trabalho foi apoiado pela empresa Tecnovia – Sociedade de Empreitadas S.A., cujas instalações e materiais cedeu para a realização da parte experimental.

O material fresado a reciclar, atualmente armazenado, provém da fresagem de camadas superficiais, fundamentalmente da camada de desgaste, de um pavimento rodoviário flexível de uma autoestrada nacional.

De forma a tomar contacto com uma área de conhecimento recentemente aplicada em Portugal, bem como concretizar a execução do objetivo de trabalho proposto, fixaram-se como principais ações:

→ Pesquisa de documentos e informação relevantes para um melhor enquadramento com o tema;

→ Formulação e produção de três misturas betuminosas do tipo AC 20 base 35/50, tradicional e com incorporação de duas taxas de material fresado diferentes;

→ Tratamento de dados obtidos, acompanhados por uma análise crítica dos resultados de forma a produzir as conclusões.

### **1.3 Estrutura**

A presente dissertação desenvolve-se ao longo de cinco capítulos que compilam a informação recolhida e os resultados dos trabalhos experimentais realizados para a conclusão deste trabalho.

No Capítulo 1 (Introdução) faz-se o enquadramento temático do estudo, salientando a importância da reciclagem a nível sustentável e económico. Apresentam-se os objetivos do trabalho, a metodologia para atingi-los e uma breve descrição do conteúdo da dissertação.

No Capítulo 2 (Estado da Arte: Misturas Betuminosas Recicladas a Quente) faz-se uma revisão bibliográfica sobre a reciclagem de pavimentos rodoviários. Inicia-se com uma descrição da reciclagem de pavimentos rodoviários, com especial incidência na reciclagem com produção a quente em central. Segue-se uma breve descrição sobre o betume, e por último, apresentam-se os métodos de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente.

No Capítulo 3 (Programa Experimental) apresenta-se o programa experimental que esta dissertação seguiu, sendo desenvolvidos, também, o caso de estudo, a caracterização dos componentes das misturas betuminosas (agregados, material fresado e betume), o método de formulação adotado e os ensaios de desempenho efetuados sobre as mesmas.

No Capítulo 4 (Apresentação e Discussão de Resultados) apresentam-se os resultados experimentais obtidos e faz-se uma análise comparativa dos resultados referentes às



propriedades das três misturas betuminosas e as dificuldades e problemas surgidos no decurso dos trabalhos experimentais.

No Capítulo 5 (Considerações Finais) efetua-se uma síntese do trabalho realizado, apresentam-se as principais conclusões deste estudo e referem-se algumas perspectivas futuras que poderão ter alguma relevância para a continuação da investigação da temática aqui abordada.



## **2. ESTADO DA ARTE: Misturas Betuminosas Recicladas a Quente**

### **2.1 Reciclagem de pavimentos rodoviários**

O desenvolvimento sustentável da Sociedade é cada vez mais um objetivo central na definição de novas estratégias de produção e construção, baseadas na seleção de métodos mais sustentáveis apresentando benefícios ambientais e económicos (Fonseca et al, 2013).

Esta crescente preocupação com a proteção ambiental que se verifica em todas as áreas, leva a que, a nível dos pavimentos rodoviários, sejam utilizadas técnicas de reciclagem de subprodutos resultantes de trabalhos de beneficiação e reforço de pavimentos flexíveis (Moreira et al, 2006). A acrescentar a esta preocupação, a constante escalada de preços sentida nos derivados do petróleo, nomeadamente no betume utilizado nos pavimentos, faz com que a reciclagem do material fresado seja cada vez mais uma alternativa de reabilitação desejável.

Assim, hoje em dia, uma das estratégias para assegurar um crescimento sustentável de uma sociedade é a reciclagem, através da reutilização de materiais, e a redução do consumo dos recursos naturais. Atualmente a disponibilidade deste tipo de recursos é limitada e cada vez mais escassa, o que exige propostas por parte da engenharia que apontem para a valorização dos materiais existentes, em vez do recurso sistemático à utilização de novos materiais e à consequente colocação em depósito dos materiais não reutilizáveis (Fonseca, 2010).

A reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis consiste na fresagem e desagregação dos materiais do pavimento existente até uma certa profundidade e posterior reutilização destes para a construção de novas camadas mediante a adição de ligantes, água, eventualmente novos agregados (como corretores granulométricos) e aditivos, como medida de reabilitação do pavimento (Branco et al, 2011).

O uso de produtos de demolição em camadas de misturas betuminosas é uma das formas de reutilizar os materiais resultantes dos trabalhos de beneficiação de pavimentos flexíveis. Recentemente, em alguns países, os aspectos ambientais prevalecem frequentemente sobre considerações económicas, particularmente quando está em discussão a reutilização de materiais (Moreira & Pereira, 2007).

Na Figura 2.1 apresenta-se o enquadramento desta temática, evidenciando também algumas alternativas à reutilização de material fresado.

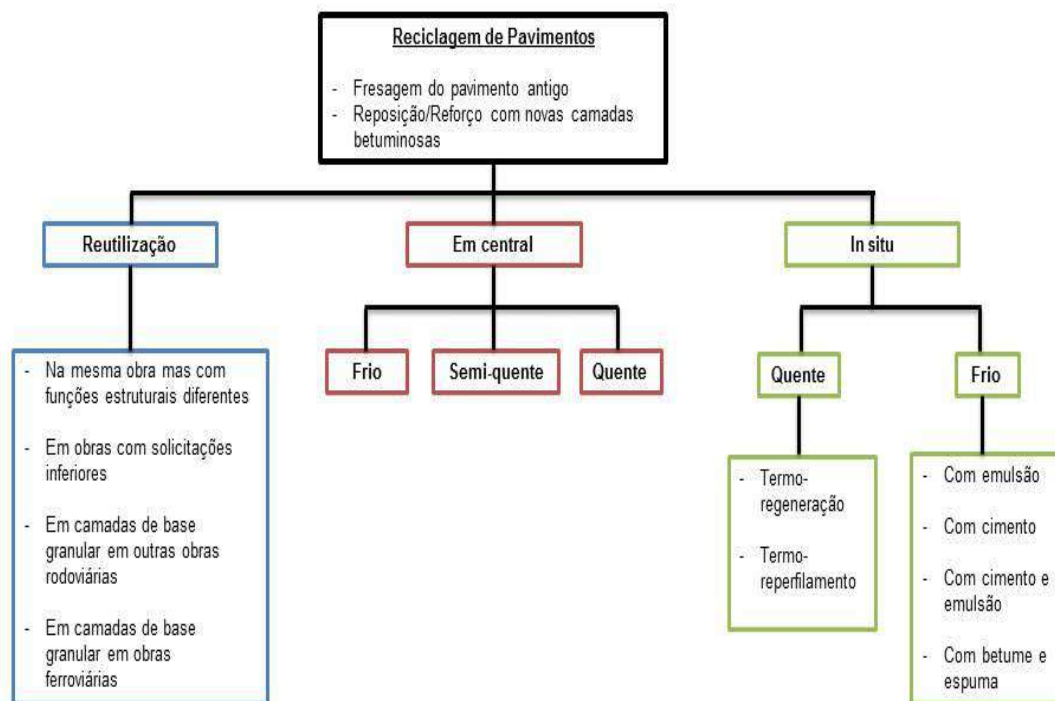


Figura 2.1 - Técnicas de reabilitação e reciclagem de pavimentos (adaptado de Moreira & Pereira, 2007).

Os objetivos de reabilitação que se estabelecem em cada obra originam um problema clássico de decisão da escolha do processo de reciclagem que melhor se adequa a cada tipo de pavimento numa determinada situação, pois em geral existe uma imensidade de possibilidades e variantes (Picado Santos et al, 2004).

Atualmente a implementação de novas normas veio encorajar a redução de resíduos pela reciclagem, reutilização ou regeneração e assim reforçar a prática de reabilitação de pavimentos utilizando técnicas de reciclagem, não só tendo em vista as questões ambientais, e porque genericamente se revela económica, mas sim porque é tecnicamente viável e adequado (Santos, 2010).

Como dito, a reciclagem de misturas betuminosas pode ser concretizada recorrendo a diferentes técnicas: a frio ou a quente, *in situ* ou em central, e com distintos ligantes (betume asfáltico, emulsão betuminosa ou cimento) (Baptista, 2006).

Nas técnicas de reciclagem *in situ*, após a fresagem dos materiais (misturas betuminosas e/ou materiais das camadas granulares) é adicionado o respetivo ligante, seguindo-se a aplicação

sequencial da mistura reciclada. Nestas técnicas, regra geral, todo o material fresado é incorporado na nova mistura.

A crescente utilização da reciclagem na produção de misturas betuminosas levou à necessidade de estabelecer especificações relativas às misturas betuminosas recuperadas, que incluem misturas provenientes da fresagem de camadas de pavimentos rodoviários existentes, a nível internacional. Neste sentido, as autoridades europeias e norte-americanas desenvolveram protocolos para o aproveitamento do material fresado como segundo agregado. Em 2005 foi criada, pelo Comité Técnico CEN/TC 227 – “Road materials”, a norma europeia EN 13108-8 respeitante a misturas betuminosas recuperadas. Posteriormente em 2006 foi-lhe dada o estatuto de Norma Portuguesa, sendo a sua edição mais actual a NP EN 13108-8:2011.

Recentemente, em Portugal, foi publicada pelo LNEC mais documentação normativa relativa à reciclagem de misturas betuminosas a quente em central – a especificação LNEC E472:2009 – e que constitui um guia para este tipo de reciclagem. Nesta especificação são definidas as condições gerais de utilização, a forma de identificar o material fresado, o campo de aplicação, as propriedades e requisitos mínimos, os métodos para a formulação das misturas e o controlo de qualidade.

A juntar a estas disposições legislativas pode-se ter em conta alguns requisitos provenientes do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CEEP) e do Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR), além do caderno de encargos respeitante a cada obra específica.

## **2.2 Reciclagem a quente em central**

O constante desenvolvimento das técnicas de reciclagem faz com que a sua aplicação seja cada vez mais usual. Todavia, a realidade europeia sobre esta temática mostra uma discrepância de valores bastante acentuada. Dados recentes indicam que o uso desta técnica em Portugal é menor do que em países como a Alemanha, a França ou a Itália (EAPA, 2012), como se pode observar no Quadro 2.1.

No entanto, em Portugal já existe alguma experiência na aplicação de material fresado em pavimentos rodoviários, com resultados animadores e que impulsionam o aparecimento de

novas perspectivas para a reutilização de grandes quantidades deste material (Moreira & Pereira, 2007), e em alguns casos com elevadas taxas de incorporação (Fonseca et al, 2013).

Quadro 2.1 - Dados estatísticos da reciclagem na Europa (EAPA, 2012).

País	RAP disponível (ton)	% de RAP disponível usado em reciclagem a:			% misturas betuminosas produzidas a quente e semi-quente que contêm RAP
		Quente	Semi-quente	Fria	
Áustria	550.000	90	-	5	-
Bélgica	1.500.000	65	-	-	50
República Checa	1.500.000	14	0	15	10
Dinamarca	600.000	80	-	20	53
Finlândia	1.000.000	-	-	-	65
França	7.080.000	45	-	-	30
Alemanha	14.000.000	84	-	16	65
Grécia	0	0	0	0	0,01
Inglaterra	4.500.000	-	-	-	-
Hungria	64.882	100	0	0	30
Islândia	15.000	-	-	25	2,5
Irlanda	100.000	40	0	-	2
Itália	11.000.000	20	-	-	-
Luxemburgo	190.000	95	0	-	80
Holanda	4.000.000	83	-	-	71
Noruega	726.000	18	-	62	10
Polónia	110.000	4	-	-	0,2
<b>Portugal</b>	<b>2.000</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
Roménia	13.000	60	12	5	8
Eslovénia	10.000	-	30	50	-
Espanha	1.350.000	73	-	17	-
Suécia	1.100.000	70	5	15	65
Suíça	1.750.000	51	18	10	23
Turquia	2.809.000	23	-	77	11

A técnica de reciclagem a quente em central (Figura 2.2) consiste em fabricar uma mistura betuminosa a quente, utilizando materiais fresados de pavimentos antigos de modo a conseguir bons resultados técnico-económicos e ambientais (Branco et al, 2011), com temperaturas de produção acima dos 140°C, consoante o betume a utilizar (EAPA, 1998).

Para isso, são adicionados novos materiais corretivos, agregados e betume, de modo a conseguir misturas com desempenho idêntico ao das misturas convencionais fabricadas a quente, como os rejuvenescedores, quando necessários, para o betume presente no material fresado recuperar algumas das suas propriedades, obtendo-se uma melhoria da qualidade da nova mistura.



Figura 2.2 - Esquema do processo de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006).

Nas técnicas de reciclagem em central, o material a reciclar, proveniente da fresagem é transportado para a central, sendo posteriormente incorporado na produção das misturas betuminosas, as quais podem ser aplicadas no local de proveniência do próprio material fresado ou em outras obras (Baptista, 2006).

A reciclagem em central a quente, de acordo com o tipo de central usada, permite taxas de reciclagem diferentes, tipicamente entre os 10 e os 30% (Hussain & Yanjun, 2013; Valdés et al 2011).

As misturas recicladas a quente em central podem ser produzidas em centrais descontínuas ou contínuas, fixas ou móveis, desde que sejam preparadas para a introdução do material fresado, a frio ou aquecido, ou adaptadas para o efeito (EAPA, 1998; Baptista, 2006).

- Central contínua

Nas centrais contínuas (Figura 2.3) existem três formas diferentes de aquecer o material fresado no tambor secador misturador antes de ser adicionado o betume. O material pode ser aquecido por chama direta, por chama indireta, ou através do contacto com os agregados sobreaquecidos (Cunha, 2010).



Figura 2.3 - Exemplo de uma central contínua móvel de fabrico de misturas betuminosas a quente [Marini-Ermont, 2014]

Na Figura 2.4 mostra-se a configuração genérica duma central contínua adaptada ao fabrico de misturas recicladas a quente.

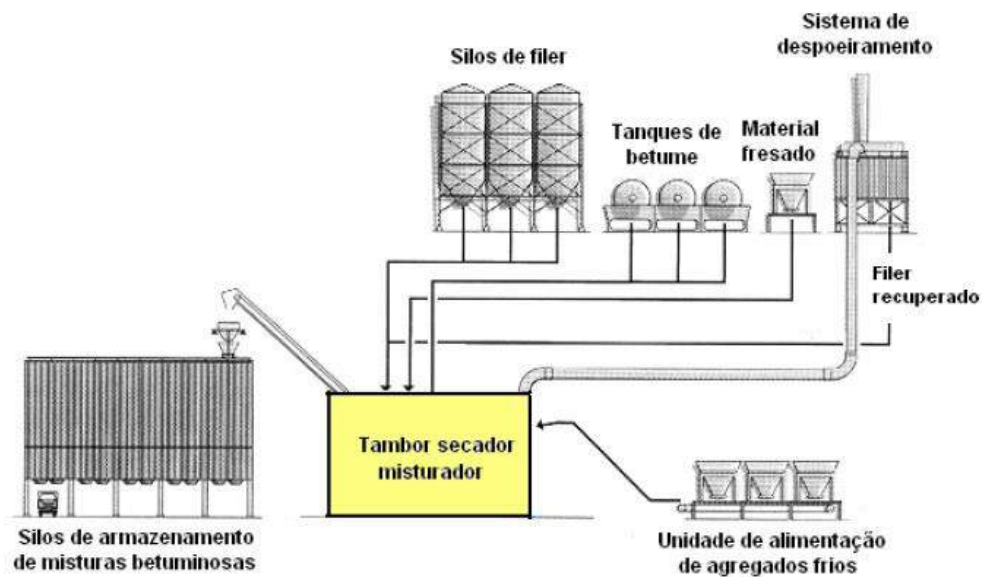


Figura 2.4 - Esquema de uma central betuminosa contínua a quente (Baptista, 2006).

Segundo (Branco et al, 2011), no esquema construtivo representado na Figura 2.5 assinalam-se os três modos possíveis de adicionar o material fresado no tambor secador/ misturador deste tipo de central:



- (1) A meio do tambor secador/ misturador (por meio de anel de incorporação);
- (2) Num invólucro exterior ao próprio tambor secador (duplo tambor);
- (3) No tambor com fluxo contracorrente (fluxos opostos).

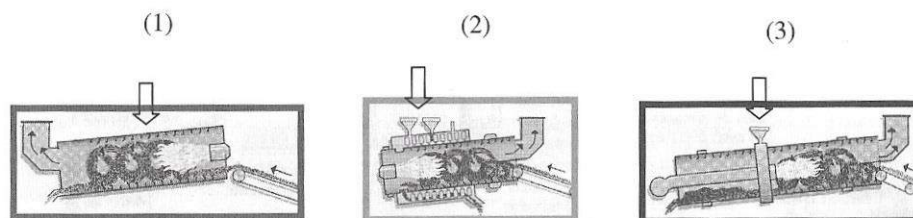


Figura 2.5 - Esquema das entradas do material fresado no tambor de uma central contínua (Ibarra, 2003 adaptado em Branco et al, 2011).

A reciclagem a quente apresenta claras vantagens de ordem económica e ambiental em relação à técnica tradicional. Desde logo pela economia ao nível dos agregados e do betume, esta mais acentuada com o aumento do preço do petróleo nos últimos anos, proporcionando menores custos de reabilitação de pavimentos rodoviários em estado de ruína. Ao nível ambiental, permite o aproveitamento dos materiais fresados diminuindo a extração de recursos naturais (agregados e betume). Relativamente às características mecânicas da mistura reciclada em comparação com as misturas convencionais, estas são idênticas, não baixando a sua contribuição na resistência (Pais et al, 2004; Fonseca, 2010).

As desvantagens, usualmente associadas à produção, estão relacionadas com a quebra na capacidade de produção das centrais e com um consequente aumento de custo energético devido ao maior aquecimento dos agregados. No entanto, embora a temperatura de aquecimento seja maior, a quantidade de agregados novos a usar é menor, pelo que em termos de gastos energéticos, o consumo é igual (Pais et al, 2004). Outra desvantagem a juntar às anteriores, e não menos importante, é o contínuo depósito de resíduos em vazadouro.

### 2.3 Obtenção, Armazenamento, Aplicação em Obra e Requisitos Mínimos

O material a incorporar em misturas betuminosas recicladas a quente pode ser proveniente da fresagem das camadas degradadas de pavimentos rodoviários (fresagem por camadas), da britagem de placas (lajes ou blocos) retiradas dos pavimentos, de lotes rejeitados ou de produções excedentárias (Figura 2.6). Estes materiais deverão ser tratados com vista a sua homogeneização e descontaminação (Baptista, 2006).



Figura 2.6 - Fresagem de camadas de pavimento (Wirtgen, 2014).

Caso o material fresado seja homogêneo e apresente uma dimensão máxima ajustada à mistura que se pretende produzir não é necessária a sua britagem. Nesta situação recomenda-se a colocação duma grelha à entrada da unidade de alimentação do material fresado e dum crivo de rejeição de material de maiores dimensões (Baptista, 2006).

Em outras situações, a britagem do material fresado pode ser necessária antes do seu armazenamento para fabrico. Se a dimensão máxima do material fresado não for excessiva, a britagem poderá fazer-se mesmo durante a alimentação da central de fabrico, recorrendo a um britador secundário para reduzir e uniformizar a granulometria do material fresado (Figura 2.7) (Baptista, 2006).

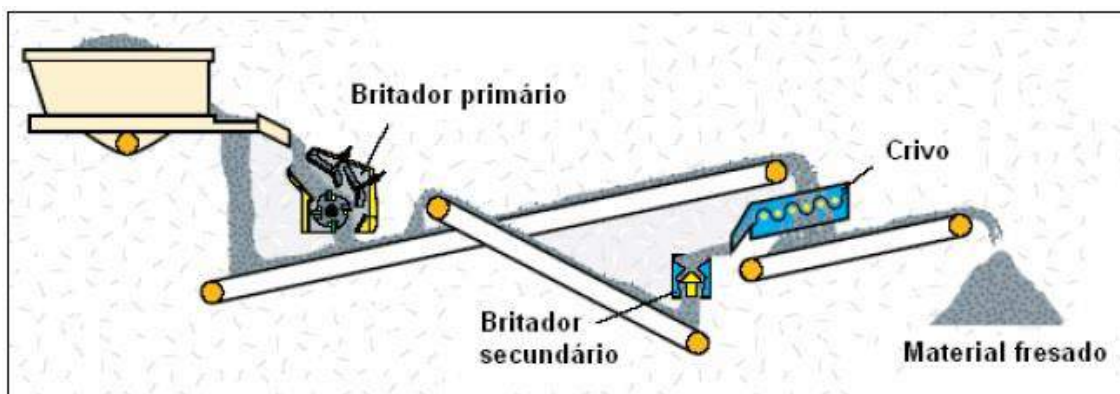


Figura 2.7 - Esquema do processo de britagem para obtenção do material fresado (Ibarra, 2003 adaptado em Baptista, 2006).

O material fresado, independentemente da forma como se obtém, deverá ser armazenado em pilhas de características homogêneas, conforme a sua origem e colocando o material por camadas, preferencialmente colocadas em locais cobertos e arejados (Figura 2.8).

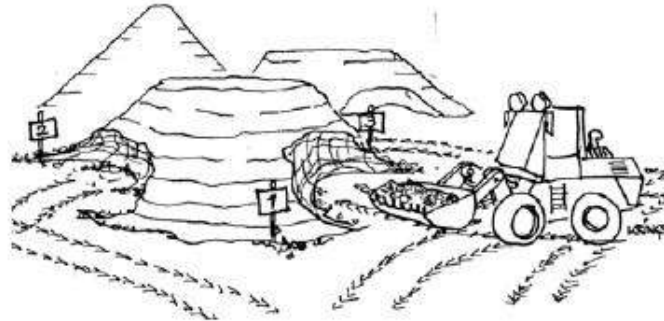


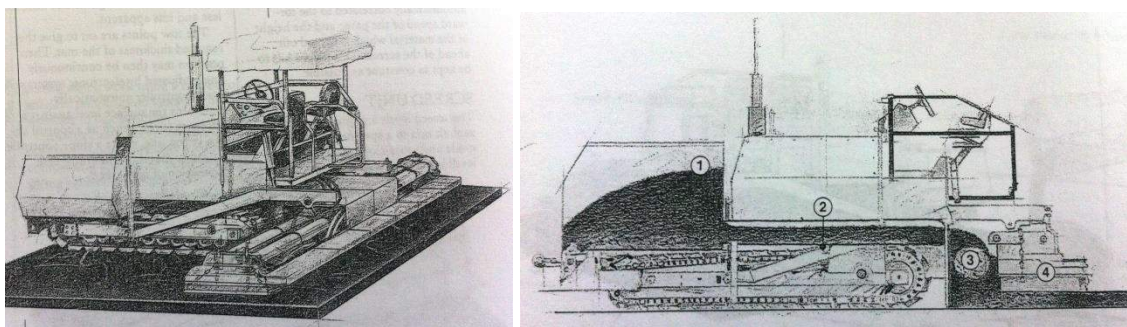
Figura 2.8 - Esquema de armazenamento de material fresado (Baptista, 2006).

Segundo (Branco et al, 2011), a aplicação em obra duma mistura betuminosa a quente (Figura 2.9) compreende as seguintes operações:

- Preparação da superfície que recebe a mistura (verificação do seu desempenho; deve ser assegurada uma boa regularidade da superfície e a não existência de material solto)
- Transporte da mistura para o local de execução (efetuado por camiões)
- Espalhamento da mistura (efetuado por pavimentadoras – Figura 2.10)
- Compactação da mistura (efetuado primeiramente por cilindros de rolos a vibrar, seguido do cilindro de pneus com pressão elevada, acabando a passar o cilindro de rolos novamente, mas sem vibrar para regularizar eventuais vincos deixados – Figura 2.11)



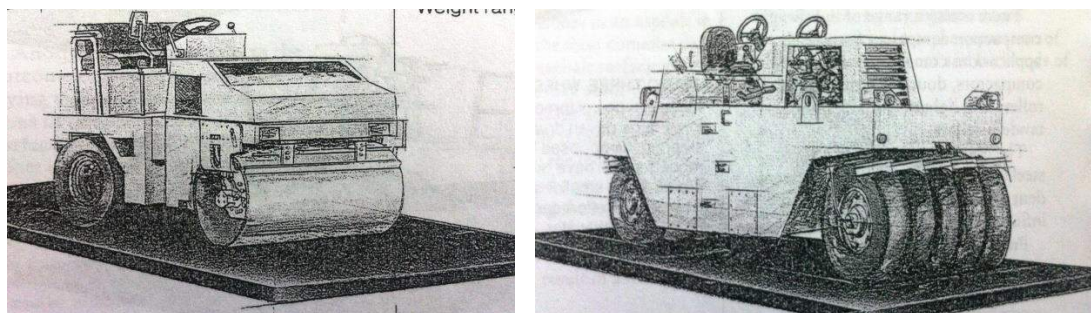
Figura 2.9 - Esquema de colocação de uma mistura betuminosa a quente em obra (Wirtgen, 2014).



(a)

(b)

Figura 2.10 - (a) Pavimentadora, (b) esquema dos componentes principais de uma pavimentadora (1- tremonha recetora, 2- transportadores, 3- comportas reguláveis, 4- mesa vibratória) (Dynapac, 2007)



(a)

(b)

Figura 2.11 - Compactadores de misturas betuminosas: a) cilindro de rolos , b) cilindro de pneus (Dynapac, 2007)

Segundo (Batista, 2004) a experiência em obras de reciclagem de pavimentos tem mostrado que nem todo o material fresado é reciclável. À semelhança dos materiais convencionais, também estes materiais devem ser selecionados por forma a cumprir certos requisitos mínimos, em função do tipo de mistura betuminosa que se pretende fabricar.

Neste sentido, na especificação do LNEC E472:2009 são contemplados os requisitos mínimos referidos nos Quadros 2.2 e 2.3. Pela mesma especificação, as misturas betuminosas recuperadas a utilizar em misturas recicladas não podem conter materiais que, pela sua natureza, forma, dimensão ou teor, possam influenciar de forma negativa as propriedades da nova mistura e, são consideradas duas possibilidades de aplicação destas misturas: a utilização em camada de desgaste ou em camadas de ligação ou regularização e de base.



No Quadro 2.2 estabelecem-se os requisitos mínimos que as misturas betuminosas recuperadas devem satisfazer para poderem ser usadas no fabrico de misturas betuminosas recicladas a quente em central.

No Quadro 2.3 indica-se o campo de aplicação e apresentam-se recomendações relativas à taxa de incorporação em função das suas características e do tipo de aplicação.

Quadro 2.2 - Propriedades e requisitos mínimos de conformidade das misturas betuminosas recuperadas (LNEC E472, 2009).

Requisitos de conformidade (EN 13108-8)		Misturas betuminosas recuperadas (MBR)			
Propriedade <sup>(1)</sup>		Norma de ensaio	MBR1	MBR2	MBR3
Presença de matéria estranha na MBR		EN 12697-42	F1	F5	F5
Ligante presente na MBR	Tipo de ligante <sup>(1)</sup>	-	Betume (tradicional) ou Betume modificado	Betume (tradicional) ou Betume modificado	Betume (tradicional), Betume modificado ou Betume duro
	Características do ligante recuperado	EN 12697-3 ou EN 12697-4 EN 1426 ou EN 1427	P15 ou S70 <sup>(2)</sup> Ou $P \geq 15 \times 10^{-1} \text{ mm}$ ou $S \leq 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>(3)</sup>	P15 ou S70 <sup>(2)</sup> Ou $P \geq 15 \times 10^{-1} \text{ mm}$ ou $S \leq 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>(3)</sup>	Pdec ou Sdec <sup>(4)</sup> Ou Declarar a natureza e as propriedades do ligante <sup>(3)</sup>
Dimensão máxima das partículas da MBR		EN 933-1+A1:2005	32mm	32mm	32mm
Agregado da MBR	Granulometria média	EN 933-1+A1:2005	Valores a declarar		
	Dimensão máxima, D				
Percentagem média de ligante na MBR		EN 12697-1	Valores a declarar		
Teor de água máximo da MBR		EN 12697-14	5%	5%	5%
P – Penetração a 25°C do ligante presente na MBR S – Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola do ligante presente na MBR <sup>(1)</sup> Ver EN 12597 <sup>(2)</sup> Requisito a aplicar no caso do ligante presente na MBR ser um betume de pavimentação (tradicional) <sup>(3)</sup> Requisito a aplicar no caso do ligante presente na MBR ser um betume modificado de pavimentação <sup>(4)</sup> Requisito a aplicar no caso do ligante presente na MBR ser um betume de pavimentação (tradicional) ou um betume duro de pavimentação					

Quadro 2.3 - Campo de aplicação e taxas máximas de incorporação de misturas betuminosas recuperadas no fabrico de misturas recicladas a quente (LNEC E472, 2009).

Classificação das MBR (EN 13108-8)	Campo de aplicação	Taxa máxima de incorporação <sup>(1)</sup>
MBR1	Camadas de desgaste	10% <sup>(2)</sup>
	Camadas de regularização, de ligação e de base	50% <sup>(2)</sup>
MBR2	Camadas de regularização, de ligação e de base	25% <sup>(2)</sup>
MBR3	Camadas de regularização, de ligação e de base	10% <sup>(2)</sup>
<sup>(1)</sup> Admitem-se taxas de incorporação superiores, recorrendo eventualmente a produtos rejuvenescedores, desde que o estudo de formulação seja complementado com ensaios para avaliação das características do ligante recuperado na mistura final e do desempenho desta mistura, nomeadamente no que se refere à resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao envelhecimento. <sup>(2)</sup> Para além de obedecer a este critério, a taxa de incorporação de MBR é condicionada pelo processo de fabrico, pelos resultados do estudo de formulação de mistura e pelas características do ligante recuperado da mistura final.		

## 2.4 Materiais constituintes: o betume

### 2.4.1 Origem

O betume é um ligante betuminoso essencial das misturas betuminosas, na medida em que liga os agregados e fornece coesão e estabilidade à mistura e proporciona ligações tenazes e flexíveis aos materiais com ele tratado. É uma mistura de hidrocarbonetos de peso molecular elevado, que se apresentam em forma de corpo viscoso mais ou menos elástico, não cristalino e de cor preta. Sendo o comportamento do betume função da temperatura, é necessário empregar, em cada caso e para cada mistura, ligantes betuminosos compatíveis com a gama de temperaturas a que estará sujeita a mistura quando integrada no pavimento (Cepsa, 2007).

De todos os betumes conhecidos, os betumes puros ainda são os mais utilizados em misturas betuminosas na pavimentação rodoviária. O betume utilizado nos tempos de hoje pode ser obtido por destilação direta do petróleo ou por tratamento de certos petróleos brutos, que constitui a parte mais densa e mais viscosa, por separação do petróleo bruto por destilação atmosférica e posteriormente, a vácuo (Branco et al, 2011), como mostra a Figura 2.12.

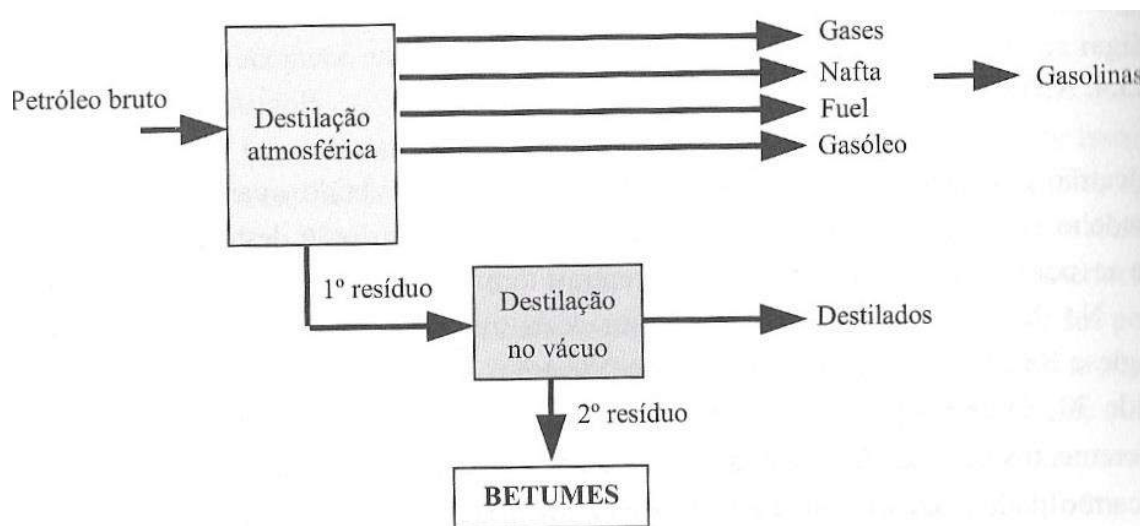


Figura 2.12 - Diagrama de produção do betume (Branco et al, 2011).

Consoante a forma de produção, é possível obter betumes com penetração mais ou menos elevada. Esta propriedade juntamente com a temperatura de amolecimento constituem duas características fundamentais dos betumes (Cepsa, 2007).

As funções mais relevantes do betume na pavimentação rodoviária são de aglutinação e impermeabilização. Como aglutinante, proporciona uma ligação forte entre agregados, capaz de resistir à ação mecânica de desagregação produzida pelas cargas dos veículos. Como impermeabilizante, garante a vedação eficaz à penetração da água, evitando desta forma danos às camadas inferiores do pavimento (Araújo, 2007).

#### 2.4.2 Composição e Constituição

O betume é constituído por uma mistura química complexa em que predominam os hidrocarbonetos, por quantidade reduzida de grupos heterocíclicos estruturalmente análogos e por grupos funcionais que contêm átomos de enxofre, nitrogénio e oxigénio (Silva, 2005). Ainda é possível encontrar vestígios de metais, como o vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio que ocorrem na forma de sais inorgânicos e óxidos ou em estruturas porfirina.

As percentagens dos componentes na constituição dos betumes não é fixa, contudo existem referências máximas e mínimas para estes valores (Whiteoak, 1990): Carbono 82 a 88%, Hidrogénio 8 a 11%, Enxofre 0 a 6%, Oxigénio 0 a 1,5%, Nitrogénio 0 a 1%.

A composição química (Figura 2.13) varia consoante a origem e o tratamento efetuado na obtenção do betume, o qual se pode enquadrar em dois grupos químicos: os asfaltenos e os maltenos. Este último pode ser subdividido em três frações: resinas, aromáticos e saturados (Leite, 1999; Silva, 2005).

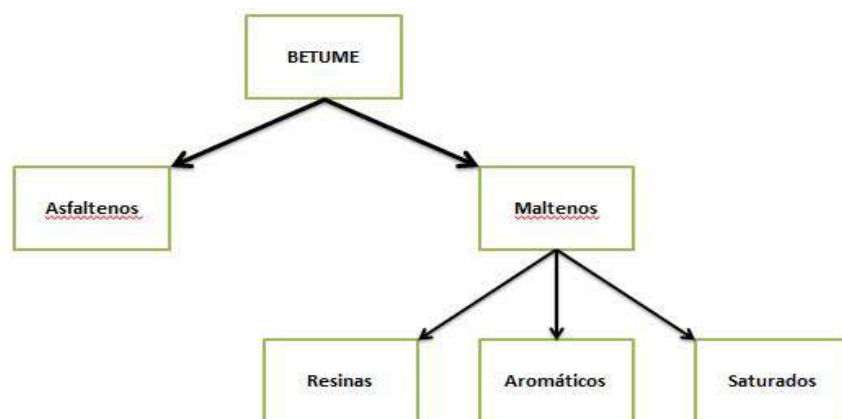


Figura 2.13 - Composição química do betume.

Relativamente à reologia do betume, o aumento do teor em aromáticos origina uma redução na susceptibilidade ao corte, e o aumento do teor em saturados amolece o betume. Por sua vez, o aumento do teor em resinas endurece o betume, reduzindo a sua penetração e suscetibilidade ao corte, aumentando a adesividade e a viscosidade. Por outro lado, o aumento do teor em asfaltenos provoca o mesmo efeito que as resinas (Silva, 2005).

Os betumes têm, portanto, uma reologia dependente da temperatura e do tempo de solicitação, sendo fundamental o estabelecimento de padrões que permitam avaliar as características de materiais desta natureza (Branco et al, 2011).

#### 2.4.3 Envelhecimento

No decorrer da preparação da mistura betuminosa, e na sua vida em serviço, em virtude da diversidade das agressões à qual é submetido, o betume sofre mudanças significativas na sua estrutura química. Como consequência direta, as suas propriedades físicas e mecânicas apresentam um comportamento distinto daquele esperado do ligante virgem (Reis, 2013).



O envelhecimento pode ser definido como a alteração sofrida pelos betumes devida à sua exposição atmosférica, nomeadamente na presença de oxigénio, o que provoca alterações nas suas propriedades, favorecendo a degradação dos pavimentos (Miranda, 2007).

A oxidação deve-se à reação dos componentes do betume com o oxigénio da atmosfera e consiste na perda das características reológicas do betume, originada pela reação do oxigénio com o hidrogénio existente no ligante proporcionando a formação de água. A eliminação do hidrogénio aumenta a relação carbono/hidrogénio originando o endurecimento do betume (aumento da viscosidade e rigidez) e a perda de ductilidade e adesividade (Pellinen et al, 2008).

O grau de oxidação é dependente da temperatura, da superfície, do tempo de exposição e da espessura da película do ligante. O endurecimento devido à oxidação tem sido considerado desde há algum tempo a principal causa de envelhecimento do betume (Whiteoak, 1990).

Fisicamente, o envelhecimento do betume é representado pelo aumento da sua consistência, apresentado como um aumento de viscosidade associado a uma diminuição da penetração e a um aumento da temperatura de amolecimento, com perda das suas características aglutinantes. Este aumento de consistência influencia o comportamento físico e reológico do ligante, deixando-o mais duro, e por conseguinte, mais quebradiço, menos dúctil e menos elástico (Whiteoak, 1990).

O envelhecimento dos betumes está normalmente associado a duas fases do seu percurso de vida: a fase construtiva, que inclui o fabrico da mistura betuminosa a quente e seu armazenamento, transporte e colocação em obra; e a fase de serviço, enquanto constituinte de uma camada do pavimento. Esta distinção faz sentido pelos fatores envolvidos, que impõem ambientes diferentes, temperatura e condições de acessibilidade do oxigénio atmosférico, e consequentemente diferentes transformações químicas e físicas (Sá da Costa & Diogo, 2012).

A Figura 2.14 representa a ocorrência do envelhecimento do betume em três fases: a primeira, de maior impacto, que ocorre aquando o fabrico da mistura betuminosa em central, representando cerca de 60% do envelhecimento total sofrido; a segunda, que ocorre durante o armazenamento, transporte e aplicação, representando 20% do envelhecimento; e a terceira, que ocorre durante a vida útil do pavimento em serviço, representando 20% do envelhecimento total (Tonial, 2001).

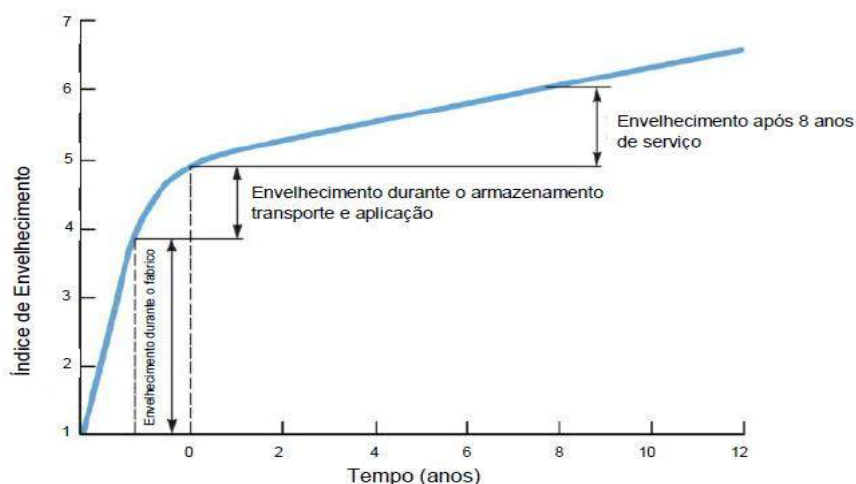


Figura 2.14 - Envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Whiteoak,1990).

Segundo o mesmo autor, durante o processo de envelhecimento, ocorre normalmente uma diminuição do teor de saturados e aromáticos, sendo que este último se transforma em resina e parte da resina se transforma em asfaltenos, ou seja, ocorre uma diminuição do teor de aromáticos e um aumento no teor de asfaltenos, como mostra a Figura 2.15, onde são expostos os resultados de estudos em termos de índice de envelhecimento (relação entre a viscosidade do ligante recuperado,  $\eta_r$ , e a viscosidade inicial do ligante a 25°C,  $\eta_0$ ) e em termos de componentes químicos.

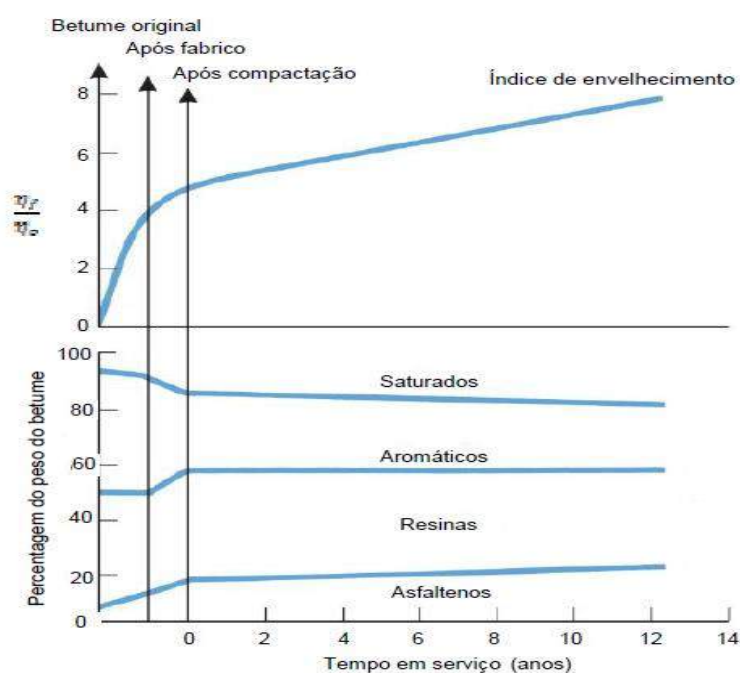


Figura 2.15 - Envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Whiteoak, 1990).

Como se pode verificar na Figura 2.15, é a curto prazo que ocorrem as maiores transformações. O aumento de asfaltenos provoca um aumento da viscosidade do betume. Estes componentes são responsáveis pelo aumento da sua rigidez e diminuição, desta forma, da flexibilidade, tornando consequentemente o pavimento mais suscetível ao fendilhamento por fadiga e a deformações (Silva, 2005).

Os principais fatores que contribuem para o envelhecimento a longo prazo são o teor de vazios da mistura, a espessura da película de betume que envolve os agregados (teor de betume), a absorção dos agregados e a espessura das camadas betuminosas (Whiteoak, 1990).

#### **2.4.4 Relação fíler/betume (f/b)**

Já há muito tempo se tem reconhecido o importante papel do fíler no comportamento de misturas betuminosas. O fíler preenche os vazios entre os agregados nas misturas e altera as propriedades dos ligantes asfálticos, pois age como parte ativa do mástique (combinação entre ligante, fíler e ar). A rigidez deste influencia as tensões desenvolvidas e a resistência à fadiga a temperaturas baixas e intermédias, e afeta a resistência à deformação permanente da mistura betuminosa a altas temperaturas (Bardini et al, 2010).

O fíler, além de preencher os vazios, aumenta a viscosidade (diminuindo a penetração) do ligante, espessando-o e encorpando-o, fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade que o ligante asfáltico correspondente. Simultaneamente, tem-se o aumento da temperatura de amolecimento, a diminuição da suscetibilidade térmica, o aumento da estabilidade, do módulo de rigidez e da resistência à tração em flexão (Santana, 1995).

Neste sentido (Motta & Leite, 2000), quanto menor o tamanho da partícula de fíler, maior é a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

Em 1947, o estudo de Rigden, demonstrou a importância do fíler no comportamento das misturas betuminosas, introduzindo um novo conceito de avaliação da porosidade, através da determinação do índice de vazios do fíler seco compactado – índice de vazios de Rigden. Neste estudo é considerada uma amostra compactada com uma certa quantidade de betume a preencher os vazios existentes entre o fíler, chamado betume fixo, sendo o restante chamado betume livre (Figura 2.16) (Matos, 2012; Quaresma, 2002).

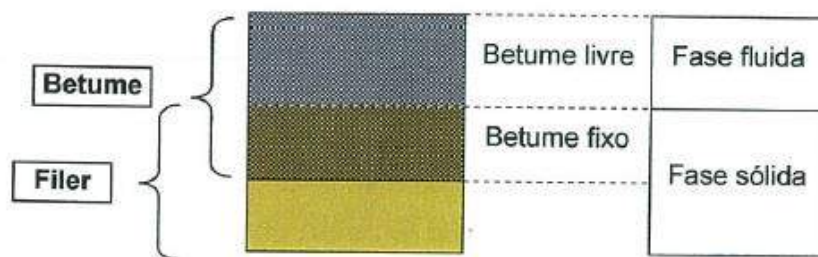


Figura 2.16 - Diagrama esquemático ilustrando a ocupação dos vazios do filer pelo betume (Quaresma, 2002).

O índice de vazios de Rigden é um método para analisar o efeito do filer na mistura betuminosa. É determinado sob condições padronizadas, em que os vazios da mistura fíler-ligante resultam numa máxima densificação do filer. Com isso é possível avaliar o teor de ligante que preencherá os vazios (Bardini et al, 2010).

Admite-se em (Motta & Leite, 2000) que, teoricamente, quando a quantidade de ligante aumenta além do índice de vazios de Rigden, as partículas perdem o contacto entre elas e a quantidade adicional de ligante promove lubrificação entre partículas. Quando a quantidade livre de ligante diminui, a rigidez aumenta. Quanto mais fino for o fíler, menor deve ser a relação fíler-ligante, pois o volume livre de ligante é que aumenta a espessura de recobrimento das partículas dos agregados.

Em estudo experimental (Quaresma, 2002) foi avaliada a relação entre o poder absorvente e o índice de vazios de Rigden de vários fíleres (cimento, cal hidráulica, calcário e fíleres de diferentes origens graníticas). Com os resultados obtidos verificou-se que os fíleres com menor índice de vazios de Rigden têm um poder absorvente mais elevado.

Atualmente, as especificações normativas em vigor no nosso país para as propriedades dos constituintes de misturas betuminosas (EN 13043) apenas têm em conta as características dos materiais e a granulometria dos fíleres, sendo a relação fíler/betume limitada a intervalos pré-definidos.

No entanto, as Estradas de Portugal reviu em 2009 o seu caderno de encargos que descreve as especificações que identificam as metodologias de formulação de mástiques betuminosos, alterando os intervalos pré-definidos para relação fíler/betume, em termos de massa, para uma nova metodologia que determina a relação fíler/betume em termos de volume, a partir das características dos mesmos. A relação volumétrica  $f/b$  é determinada pela seguinte expressão (Estradas de Portugal, 2009):

$$\frac{f}{b} = \frac{(100-v) \times \Delta T_{ab}}{1021,2 + \Delta T_{ab} \times v} \quad (2.1)$$

Onde  $f/b$  é a relação volumétrica fíler/betume (%),  $v$  é o volume de vazios do fíler seco compactado (ou índice de vazios de Rigden) (%),  $\Delta T_{ab}$  é o aumento da temperatura de amolecimento anel e bola em relação ao betume que o originou (°C). Esta expressão foi desenvolvida no Centro de Investigação Rodoviário Belga (BRRC) para prever o endurecimento do mástique com o fíler, no qual concluíram que o comportamento das misturas betuminosas é otimizado quando o mástique apresenta um aumento na temperatura de amolecimento entre 12 e 16 °C, para betumes de penetração nominal 50/70 (Matos et al, 2014; CRR, 1987). De acordo com (Quaresma, 2002), neste intervalo as misturas betuminosas apresentam comportamentos satisfatórios.

Em (Antunes, 2013), o autor conclui que a partir dos estudos realizados por BRRC foi possível deduzir quais as variações de temperatura ideais para que se obtenha o mesmo comportamento para mástiques com betume de penetração nominal 35/50 para uma mesma razão  $f/b$ . Com base nessa dedução foi obtido um intervalo entre 9,45°C e 11,60°C.

## 2.5 Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas

### 2.5.1 Considerações Gerais

A utilização de métodos de formulação de misturas betuminosas tem como objetivo determinar a combinação de agregados e betume numa mistura, de tal modo que se obtenha um material de pavimentação tão económico quanto possível e com as características desejadas (Pais et al, 2001).

Uma mistura betuminosa reciclada a quente difere numa mistura tradicional a quente na medida em que, na sua composição, além dos agregados e do betume asfáltico, existe um outro componente, a mistura betuminosa recuperada, e em alguns casos, um rejuvenescedor do betume (Bento, 2010).

De um modo geral, os métodos usados na formulação de misturas betuminosas a quente são adaptáveis ao estudo das misturas betuminosas recicladas a quente. Contudo, a adequação desses métodos exige a avaliação de parâmetros adicionais durante o processo de formulação,

que visam refletir a influência das propriedades do material fresado nas características da mistura reciclada final (Oliveira et al, 2007).

As metodologias de formulação existentes diferem, essencialmente, na caracterização do material fresado, no processo de seleção do tipo de betume e/ou rejuvenescedor e na metodologia usada para fixar a percentagem de betume da mistura reciclada (Aravind e Das, 2007).

Os principais passos seguidos na formulação das misturas betuminosas recicladas a quente são comuns à maioria dos métodos existentes. O processo geral de formulação de misturas betuminosas pode resumir-se aos seguintes passos fundamentais: caracterização dos materiais, estabelecimento da composição de base e escolha da fórmula para execução. No caso das misturas betuminosas recicladas a quente, no primeiro passo, além das características dos materiais novos, avaliam-se também as propriedades do material fresado (Baptista, 2006).

Segundo o mesmo autor, nas diversas fases do processo de formulação das misturas e, também, no controlo de qualidade são consideradas determinadas propriedades dos materiais elementares e das misturas compactadas, as quais devem cumprir as exigências de conformidade estabelecidas em caderno de encargos ou especificações aplicáveis.

### 2.5.2 Composição das Misturas Betuminosas Recicladas

As misturas betuminosas recicladas produzidas a quente contêm, além de agregados e betume virgens, material fresado (Figura 2.17). A estes, podem adicionar-se diferentes tipos de aditivos, com o fim de melhorar o comportamento do produto. As suas principais características são função das proporções dos materiais misturados e das suas propriedades.



Figura 2.17 - Composição de uma mistura reciclada (adaptado de (Aravind e Das, 2007)).

Depois de misturados e aquecidos em central, são transportados, espalhados e compactados formando uma camada de pavimento (Branco et al, 2011).

Em termos gerais, são exigidas às misturas betuminosas as seguintes características: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Branco et al, 2011).

### **2.5.3 Método do Asphalt Institute (AI)**

O método de formulação do Asphalt Institute para misturas betuminosas recicladas a quente adverte para a utilização tanto do método Marshall como do método Hveem utilizados na formulação de misturas betuminosas convencionais, adicionando alguns procedimentos para a análise do material fresado visando a satisfação do fuso granulométrico das especificações e a determinação da percentagem de ligante novo.

Neste método, o primeiro passo corresponde à caracterização do material fresado e dos agregados novos. Determina-se a granulometria do material fresado após extração do betume, a percentagem de betume e a viscosidade a 60°C do betume recuperado. Se a taxa de reciclagem for baixa (entre 15 e 20%) não é necessário avaliar a viscosidade do betume recuperado (Kandhall & Foo, 1997). Nesta situação, como o betume presente no material fresado tem pouca influência nas características do ligante final, o betume novo a adicionar é idêntico ao de uma mistura normal.

Este método de formulação foi desenvolvido para taxas de incorporação de material fresado que varia entre 20 e 70%. A figura 2.18 ilustra as fases constituintes do procedimento e é acompanhada da explicação de algumas delas (Asphalt Institute, 1986):

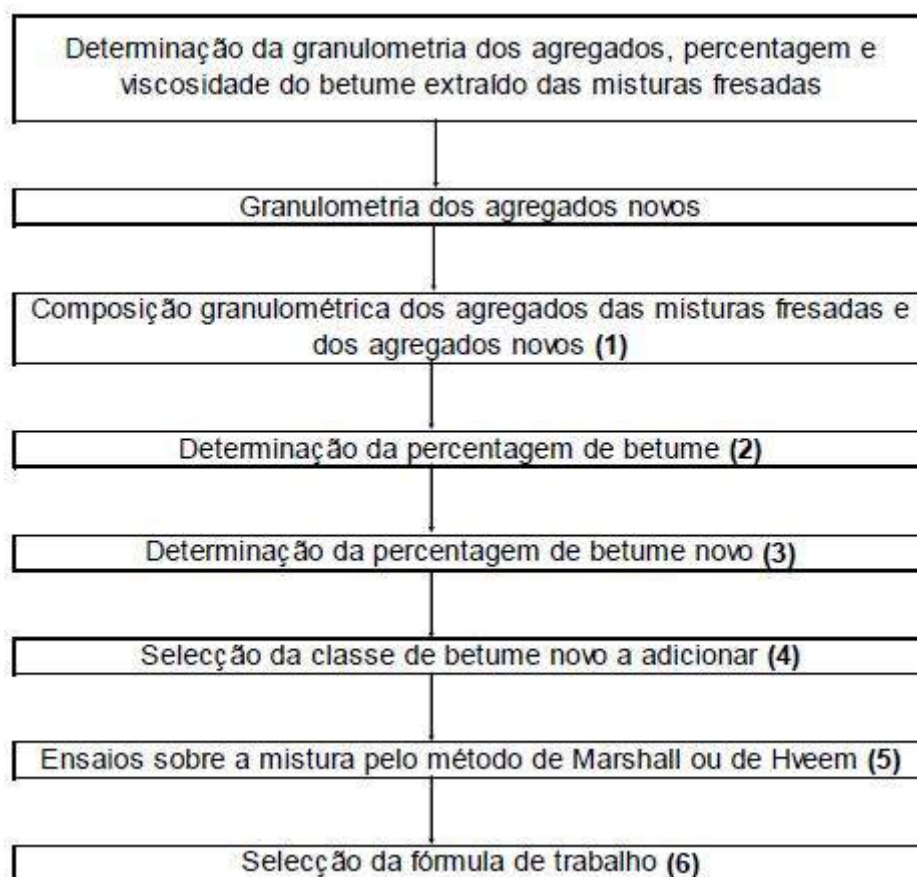


Figura 2.18 - Organograma para formulação de misturas betuminosas a quente (adaptado de (Asphalt Institute, 1986))

#### **(1) Composição granulométrica dos agregados das misturas fresadas e dos agregados novos**

Através das análises granulométricas dos agregados contidos no material fresado e dos agregados novos, determinam-se as respetivas proporções na mistura.

#### **(2) Determinação da percentagem de betume**

A percentagem de betume pode ser determinada pelo CKE (*California Kerosene Equivalent*), incluído no método Hveem, ou pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$P_b = 0.035 \times a + 0.045 \times b + K \times c + F \quad (2.2)$$

Onde,  $P_b$  é a percentagem total aproximada de betume para a mistura reciclada em relação à massa total da mistura;  $a$  é a percentagem de agregados retidos no peneiro nº8 (ASTM);  $b$  é a percentagem de agregados passados no peneiro nº8 (ASTM) e retidos no peneiro nº200;  $K$  é uma constante, função da quantidade de material que passa no peneiro nº200 (pode assumir



os seguintes valores:  $K = 0,15$  para 11-15% de material passado no peneiro nº 200,  $K = 0,18$  para 6-10% de material passado no peneiro nº 200,  $K = 0,20$  para <5% de material passado no peneiro nº 200;  $c$  é a percentagem de agregados passados no peneiro nº200;  $F$  é o fator de absorção dos agregados com valores entre 0 e 2% (na ausência de dados pode-se usar 0,7%).

### (3) Determinação da percentagem de betume novo

Neste passo estima-se a percentagem de ligante novo na mistura.

$$P_{bn} = P_b - \frac{P_{bmf} \times TR}{100} \quad (2.3)$$

Onde,  $P_{bn}$  é a percentagem de betume novo expressa como percentagem da massa total da mistura;  $P_b$  é a percentagem de betume determinada em (2);  $P_{bmf}$  é a percentagem de betume do material fresado; TR é a taxa de reciclagem.

### (4) Seleção da classe de betume

O betume novo é selecionado através da viscosidade que lhe é requerida e é determinada num gráfico logarítmico que relaciona a viscosidade com a percentagem de betume novo (*viscosity blending chart*) (figura 2.19).

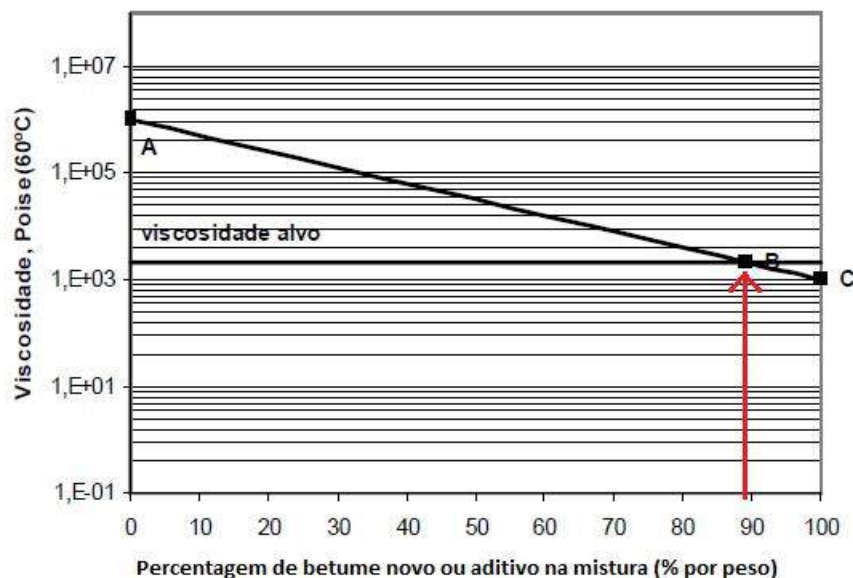


Figura 2.19 - Determinação da viscosidade requerida para o betume novo ou aditivo a adicionar (Lima, 2003).

A viscosidade da mistura do betume recuperado com o betume novo (e/ou aditivo rejuvenescedor) é selecionada, sendo comumente escolhida, segundo o Asphalt Institute, como 2000 Poise (a unidade análoga no Sistema Internacional de Unidades é o pascal-segundo, Pa.s, em que  $1\text{Pa.s}=10\text{ Poises}$ ).

O processo consiste em marcar o ponto A que corresponde à viscosidade do betume do material fresado. Marca-se uma linha horizontal correspondendo a viscosidade alvo (2000 Poise). Marca-se o ponto B correspondente à percentagem de betume novo em relação ao betume total. Une-se os pontos A e B e prolonga-se a reta até se encontrar o ponto C. A viscosidade do betume novo deverá ser a correspondente ao ponto C (Lima, 2003; Baptista, 2006).

#### **(5) Ensaio sobre a mistura pelo método de Marshall ou de Hveem**

Realizam-se os ensaios convencionais de acordo com o método de formulação adotado, Hveem ou Marshall.

#### **(6) Seleção da fórmula de trabalho**

Determina-se a fórmula de trabalho para obtenção da mistura final.

#### **2.5.4 Método *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave)***

As misturas betuminosas recicladas a quente em central têm sido formuladas pela metodologia *Superpave*, apesar deste método também ser usado em outros tipos de produção. No entanto, antes de seguir a metodologia atrás mencionada, a seleção do ligante novo a utilizar é função das propriedades que a mistura reciclada deverá ter e das propriedades do ligante recuperado do material fresado. Para tal, foram desenvolvidos gráficos (*blending chart*), analogamente ao método do Asphalt Institute, para avaliação dos resultados obtidos no ensaio com o reómetro de corte directo (DSR), em termos de temperatura (Baptista, 2006).

Nos Estados Unidos da América os betumes podem ser classificados de acordo com os limites de penetração a 25°C, segundo os limites da viscosidade a 60°C ou pelo grau de desempenho PG (*Performance Grade*) (Bento, 2010).

Em (Barrão, 2011), segundo a classificação com base nos critérios decorrentes do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) é definido PG do betume virgem como o desempenho das propriedades físicas deste em serviço quando sujeito a amplitudes térmicas elevadas, sendo a temperatura do ar convertida em temperatura do pavimento, seguindo a especificação ASTM D6373. A escolha do PG é de acordo com o clima onde o pavimento irá ser utilizado. Por exemplo, uma classificação PG Tx-Ty significa que o betume preenche os critérios de propriedades físicas a altas temperaturas até uma temperatura de Tx°C e os critérios de propriedades físicas a baixas temperaturas até -Ty°C.

Com base no desempenho, PG, o sistema de classificação Superpave foi concebido para melhorá-lo em pavimentos com misturas betuminosas selecionando o ligante com propriedades físicas que permitam resistir às ações a que as mesmas estão sujeitas em serviço, nomeadamente, fadiga e deformações permanentes, e ações durante o fabrico e aplicação. Estas propriedades dependem da temperatura à qual são avaliadas (Kandhall & Foo, 1997).

Em suma, comparativamente ao método anterior, existem diferenças no que respeita à caracterização do betume recuperado do material fresado e à forma de selecionar o betume novo. Em função da taxa de reciclagem, TR, e da graduação PG do betume recuperado do material fresado, são recomendadas as opções de seleção do betume novo (Kandhall & Foo, 1997):

- Se **TR < 15%**: usar betume normal (caso da mistura convencional)
- Se **15% < TR < 25%**: selecionar betume um grau PG abaixo do betume normal
- Se **TR > 25%**: selecionar o grau PG do betume com base nos gráficos de composição *blending charts*

Neste último caso, será necessária a recuperação de ligante do material fresado para avaliação das características necessárias à caracterização Superpave. Os gráficos necessários para tal, determinam o valor requerido da temperatura do ligante reciclado para que ele adquira uma determinada rigidez à temperatura especificada (Lima, 2003).

A seleção do ligante betuminoso novo a utilizar tem em conta a definição de três temperaturas: alta, intermédia e baixa, apresentadas no Quadro 2.4 (Kandhall & Foo, 1997).

Quadro 2.4 - Temperaturas para seleção do ligante betuminoso (Khandall & Foo, 1997).

Temperatura	Definição
<u>Alta</u>	A menor temperatura de: a) Temperatura à qual $G^*/\sin(\delta)$ do betume recuperado é igual a 1kPa b) Temperatura à qual $G^*/\sin(\delta)$ do betume recuperado após envelhecimento RTFOT é igual a 2,2kPa
<u>Intermédia</u>	Temperatura à qual $G^* \times \sin(\delta)$ do betume recuperado após envelhecimento RTFOT e PAV é igual a 5 MPa
<u>Baixa</u>	A maior temperatura de: a) Temperatura à qual $S=300\text{MPa}$ e $m>0,3$ b) Temperatura à qual $S<300\text{MPa}$ e $m=0,3$ (ou $300\text{MPa}<S<600\text{MPa}$ e $m>0,3$ ) c) Temperatura à qual a extensão de rotura é 1%

NOTA: São realizados os ensaios previstos (Figura 2.20): *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) para a mistura recuperada, DSR após *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), DSR após *Pressure Aging Vessel* (PAV), *Bending Beam Rheometer* (BBR) após PAV, para determinar o comportamento viscoelástico da mistura e consequentes temperaturas.  $G^*$  e  $\delta$  correspondem aos valores do módulo de corte complexo e ângulo de fase obtidos no ensaio DSR.  $S$  e  $m$  correspondem aos valores da rigidez e da taxa de variação da rigidez com o tempo obtidas no ensaio BBR.

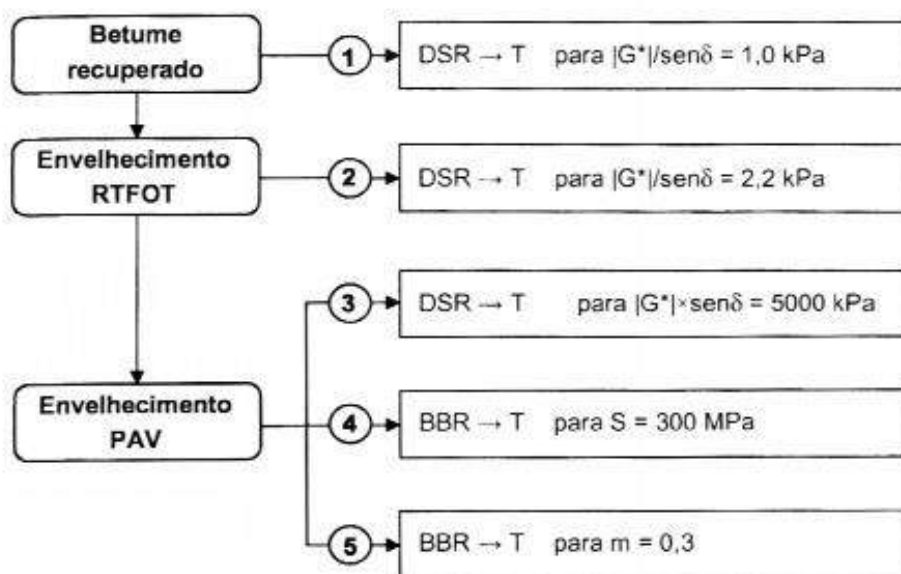


Figura 2.20 - Esquema de ensaios seguido na caracterização do betume pela metodologia Superpave (Bento, 2010).

Tal como referido, são construídos gráficos com base nos resultados dos ensaios DSR. Na Figura 2.21 e Figura 2.22 apresenta-se o caso da temperatura alta:

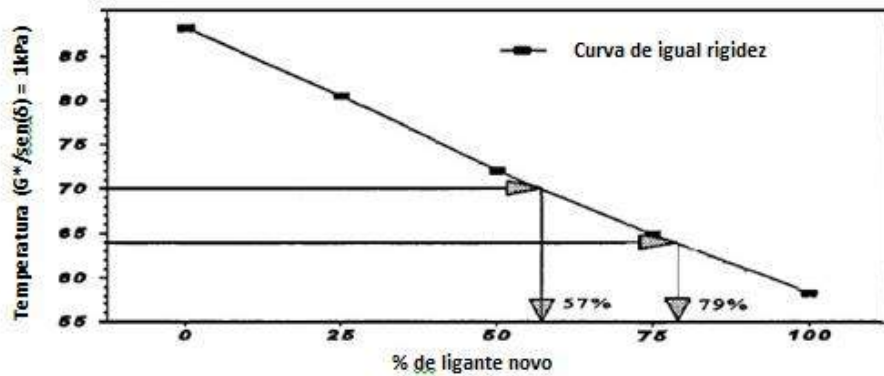


Figura 2.21 - Gráfico 1 de temperatura (alta) (Temperature Blending Charts) (Kandhall & Foo, 1997).

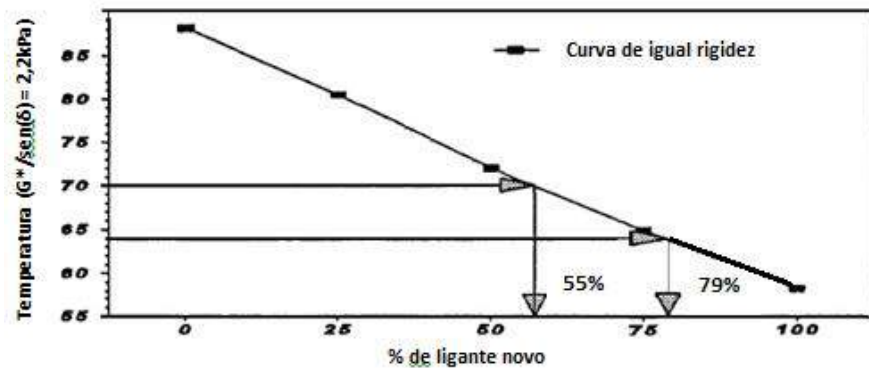


Figura 2.22 - Gráfico 2 de temperatura (alta) (Temperature Blending Charts) (Kandhall & Foo, 1997).

Para a temperatura intermédia é traçado um gráfico semelhante de temperatura com as grandezas  $G^* \times \sin(\delta) = 5 \text{ MPa}$ . No caso da temperatura baixa, é traçado um gráfico “Rigidez (S) vs. % ligante novo” e um “Taxa de variação da rigidez (m) vs. % ligante novo”. Baseado nestas temperaturas, adopta-se um valor (% de ligante novo) que atenda a todos eles. O objetivo é definir, para uma determinada classe de betume PG, a percentagem de betume novo na mistura dos dois betumes (Lima, 2003).

De acordo com (Baptista, 2006) e (Lima, 2003), uma outra abordagem sobre o cálculo das temperaturas pode ser considerada. Obtidas as três temperaturas críticas (alta, média e baixa), existem duas metodologias: o método A, aplicável no caso da taxa de reciclagem ser conhecida e pretendendo selecionar o tipo de betume novo, e o método B, a aplicar quando se conhece o tipo de betume novo e se pretende avaliar os limites da taxa de reciclagem. Em ambos os casos é conhecida a graduação PG pretendida para o ligante final.

▪ Método A

Determinam-se, para cada uma das três temperaturas críticas, as correspondentes temperaturas críticas do ligante novo, em função da taxa de reciclagem e das respectivas temperaturas críticas pretendidas para o ligante final. Para cada caso, pode recorrer-se a uma representação gráfica (Figura 2.23) ou, simplesmente, usar a seguinte expressão:

$$T_v = \frac{T_m - TR \times T_f}{1 - TR} \quad (2.4)$$

Onde,  $T_v$  é a temperatura crítica do betume virgem (alta, média ou baixa), em °C;  $T_m$  é a temperatura crítica da mistura de ligantes desejada (virgem+recuperado) (alta, média ou baixa), em °C;  $T_f$  é a temperatura crítica do ligante do fresado (alta, média ou baixa), em °C; TR é a taxa de reciclagem.

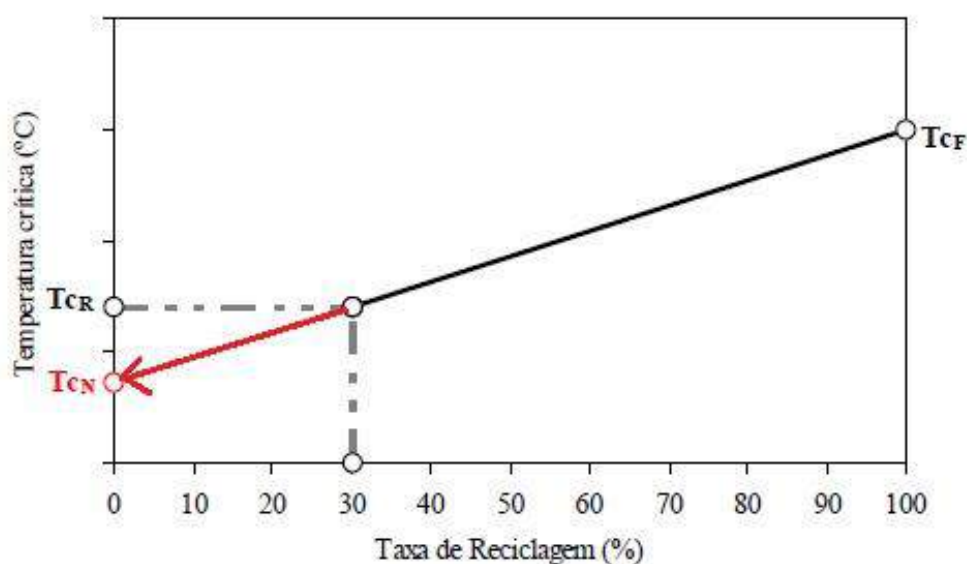


Figura 2.23 - Representação gráfica da obtenção das temperaturas críticas do betume novo ( $T_v$  ou  $T_{cn}$ ) em função da taxa de reciclagem e das temperaturas críticas do ligante do fresado ( $T_f$  ou  $T_{cf}$ ) e do ligante final ( $T_m$  ou  $T_{cr}$ ).

Determinadas as temperaturas críticas do betume novo, seleciona-se um betume cuja graduação PG satisfaça os resultados.

- Método B

Determina-se para cada um dos conjuntos de temperaturas críticas (altas, médias e baixas) dos ligantes, a taxa de reciclagem correspondente. Para isso, recorre-se, em cada caso, à representação gráfica ilustrada na Figura 2.24, ou à expressão (onde as variáveis tem o significado referido anteriormente):

$$TR = \frac{T_m - T_v}{T_f - T_v} \quad (2.5)$$

Elaboram-se três gráficos, sendo um para cada temperatura crítica (alta, intermediária e baixa) versus a percentagem de fresado.

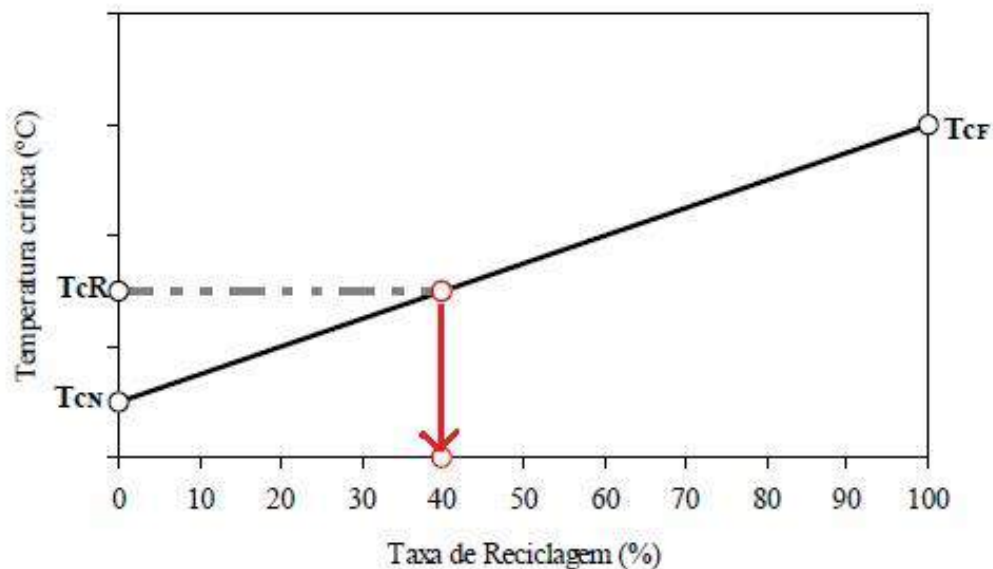


Figura 2.24 - Representação gráfica da obtenção da TR em função das temperaturas críticas do betume novo (T<sub>v</sub> ou T<sub>cn</sub>), do ligante do fresado (T<sub>f</sub> ou T<sub>cf</sub>) e do ligante final (T<sub>m</sub> ou T<sub>cr</sub>)

A taxa de reciclagem máxima será o menor dos valores encontrados para as três temperaturas críticas.

Ressalte-se que, em ambos os métodos, as temperaturas críticas a considerar para o betume final devem respeitar o previsto na classificação segundo a graduação PG prevista na ASTM D 6373 (ASTM, 1999):

$$\begin{aligned}Tc_{alta} &\leq Tx \\Tc_{med} &= \frac{Tx+Ty}{2} + 4 \\Tc_{baixa} &\geq Ty\end{aligned}\tag{2.6}$$

Sendo,  $Tx$  a temperatura alta (°C) do PG e  $Ty$  a temperatura baixa (°C) do PG.

#### **2.5.5 Método baseado nas normas europeias: EN 13108**

A maioria dos países da Europa adotaram uma metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente baseada na norma europeia EN 13108, que tem como objetivo a obtenção da percentagem ótima de betume a usar na mistura final a partir do método de Marshall, ao qual se junta a caracterização do material fresado.

No entanto, existem países como a Holanda e o Reino Unido que desenvolveram as suas próprias práticas de reciclagem utilizando RAP e introduziram diretrizes sobre o uso de materiais como segundo agregado na construção de estradas (Tabakovic et al, 2010).

Nos trabalhos experimentais adoptou-se a metodologia baseada na norma europeia NP EN 13108:2011, adaptando-a às condições laboratoriais disponíveis, às particularidades da composição das misturas e com taxas de reciclagem definidas à partida, cujo fluxograma é apresentado na Figura 2.25, tal como em (Baptista, 2006). Após a obtenção da fórmula de estudo é feita a sua transposição para a central de fabrico.



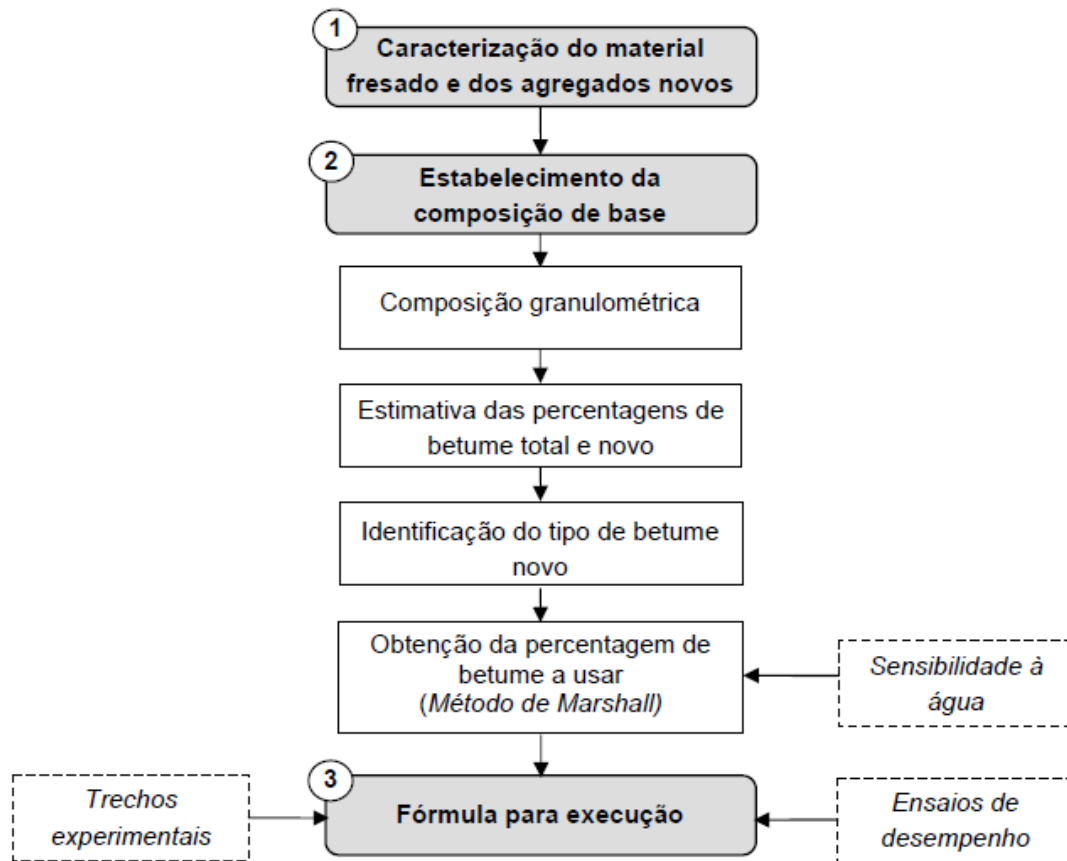


Figura 2.25 - Organograma da metodologia adotada para formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Baptista, 2006).

Na primeira fase é feita a caracterização do material fresado e dos agregados novos, avaliando a sua granulometria e a percentagem de betume recuperado pelo método de incineração ou centrifugação, bem como a sua penetração e temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola.

Na segunda fase estabelece-se a composição de base, incluindo o material fresado na mistura de modo a encaixá-la no fuso granulométrico previsto no caderno de encargos.

A partir da percentagem de betume do material fresado, é definido o tipo de betume virgem, recorrendo à relação logarítmica entre a penetração dos ligantes e à relação entre as suas temperaturas de amolecimento. Selecionado o betume novo, obtém-se a percentagem de betume a usar pelo método de Marshall.

Neste método, os provetes são numerados em ordem crescente de percentagem de betume, no mínimo cinco, variando em intervalos de 0,5%. Para uma mistura betuminosa fechada, a

baridade dos provetes é determinada de acordo com o método saturado com superfície seca. Em seguida, e para cada percentagem de betume em estudo, determinam-se os valores médios da baridade aparente, estabilidade, porosidade, deformação e volume de vazios na mistura de agregados (VMA), com os quais é possível traçar gráficos como os apresentados na Figura 2.26.

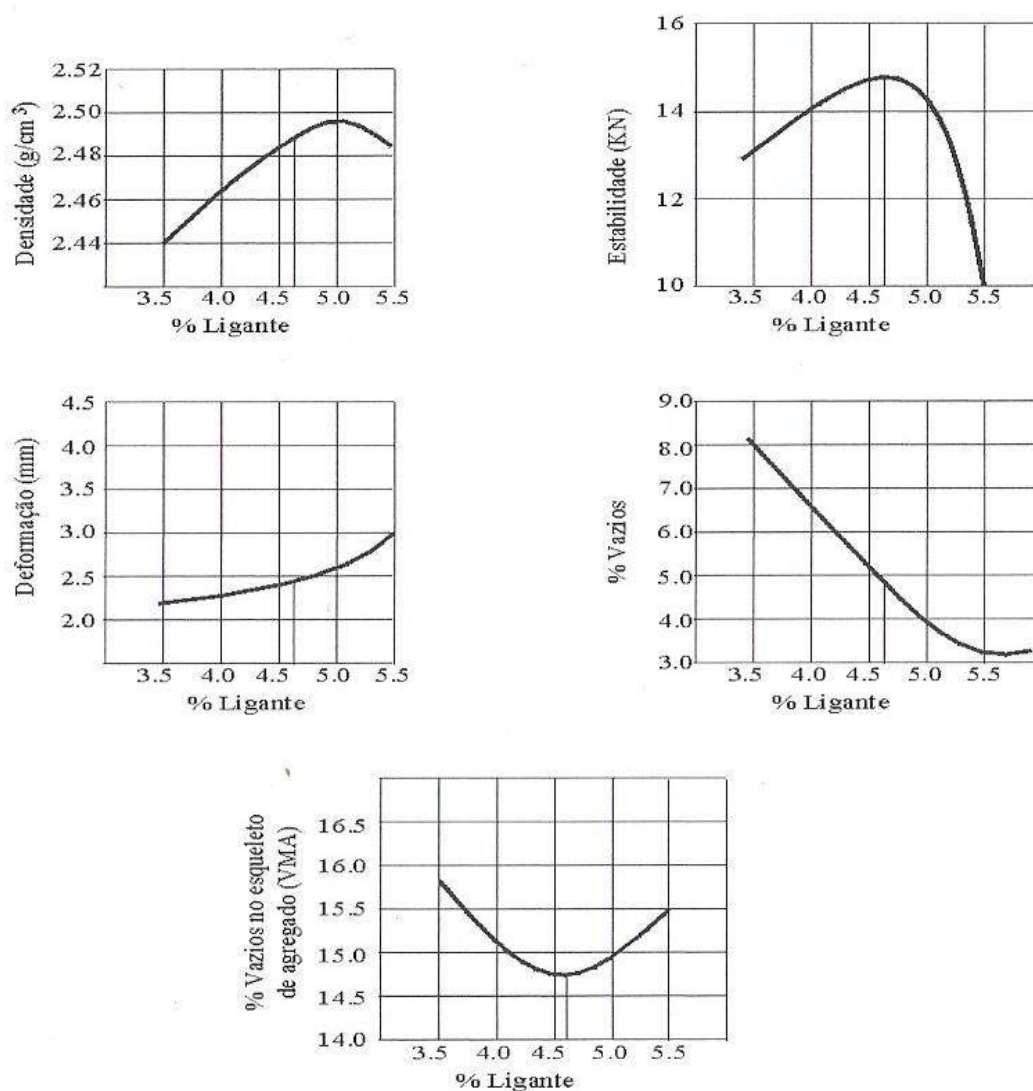


Figura 2.26 - Representação gráfica da variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem de betume com que foram fabricados pelo Método de Marshall (Branco et al, 2011).

A percentagem ótima de betume para a mistura estudada é obtida pela média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade. O valor encontrado deverá corresponder a uma deformação e a um VMA dentro de certos limites impostos pelas especificações aplicáveis.

Por último, na terceira fase, após a avaliação da sensibilidade à água e/ou da resistência conservada, transpõe-se a fórmula para os trechos experimentais e a mistura é complementarmente avaliada segundo os ensaios de desempenho (característicos da abordagem fundamental). Caso a avaliação dos resultados dos ensaios for positiva, é estabelecida a fórmula de trabalho final, em função destes. No caso de uma avaliação negativa, é necessário reformular a mistura betuminosa (em termos de tipo de materiais e composição, por exemplo).



### **3. Programa Experimental**

#### **3.1 Considerações Gerais**

Toma-se como base do programa experimental o enquadramento normativo preconizado pela norma europeia NP EN 13108-1:2011 (norma de produto para misturas betuminosas tipo 'betão betuminoso') e pelo seu Anexo Nacional. São descritos neste documento dois tipos de abordagem para especificar a mistura betuminosa: uma abordagem empírica baseada em metodologias de formulação e requisitos para os materiais usados na composição da mistura betuminosa, com requisitos adicionais baseados em testes de desempenho; e uma abordagem fundamental baseada unicamente em requisitos de desempenho, associados a prescrições básicas relativas aos materiais e à formulação, oferecendo um maior grau de liberdade, isto é, a formulação de misturas betuminosas relacionada com o seu comportamento visa a obtenção, através de ensaios mecânicos (fundamentais ou de simulação), da composição que garante determinado nível de comportamento desejado para a mistura betuminosa.

De acordo com o estipulado na mesma norma o objectivo final é especificar o betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho. A estes, juntam-se os requisitos dos materiais constituintes da mistura betuminosa e os requisitos gerais que a mistura betuminosa deve satisfazer.

#### **3.2 Caso de estudo**

A parte experimental deste trabalho consistiu em realizar os estudos de formulação e de avaliação das características e comportamento de um tipo de mistura betuminosa produzida a quente com incorporação de material fresado, e foi desenvolvida nas instalações de uma empresa portuguesa do setor da construção civil, *Tecnovia – Sociedade de Empreitadas S.A.*

É estudada uma mistura betuminosa designada, pela nomenclatura adotada pelas normas europeias, como AC 20 base 35/50 (MB) – Macadame Betuminoso Fuso A, com percentagens de incorporação de 0%, 10% e 20% de material fresado, de acordo com a produção em central atual da empresa.

Os ensaios realizados sobre estas misturas betuminosas visam a sua caracterização laboratorial e posterior comparação dos valores obtidos entre si e com os requisitos normalmente definidos para este tipo de misturas pelas normas, especificações e cláusulas técnicas aplicáveis.

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Évora e no Laboratório Central, situado em Rio Maior.

A Figura 3.1 mostra o fluxograma dos trabalhos experimentais realizados para a presente dissertação.

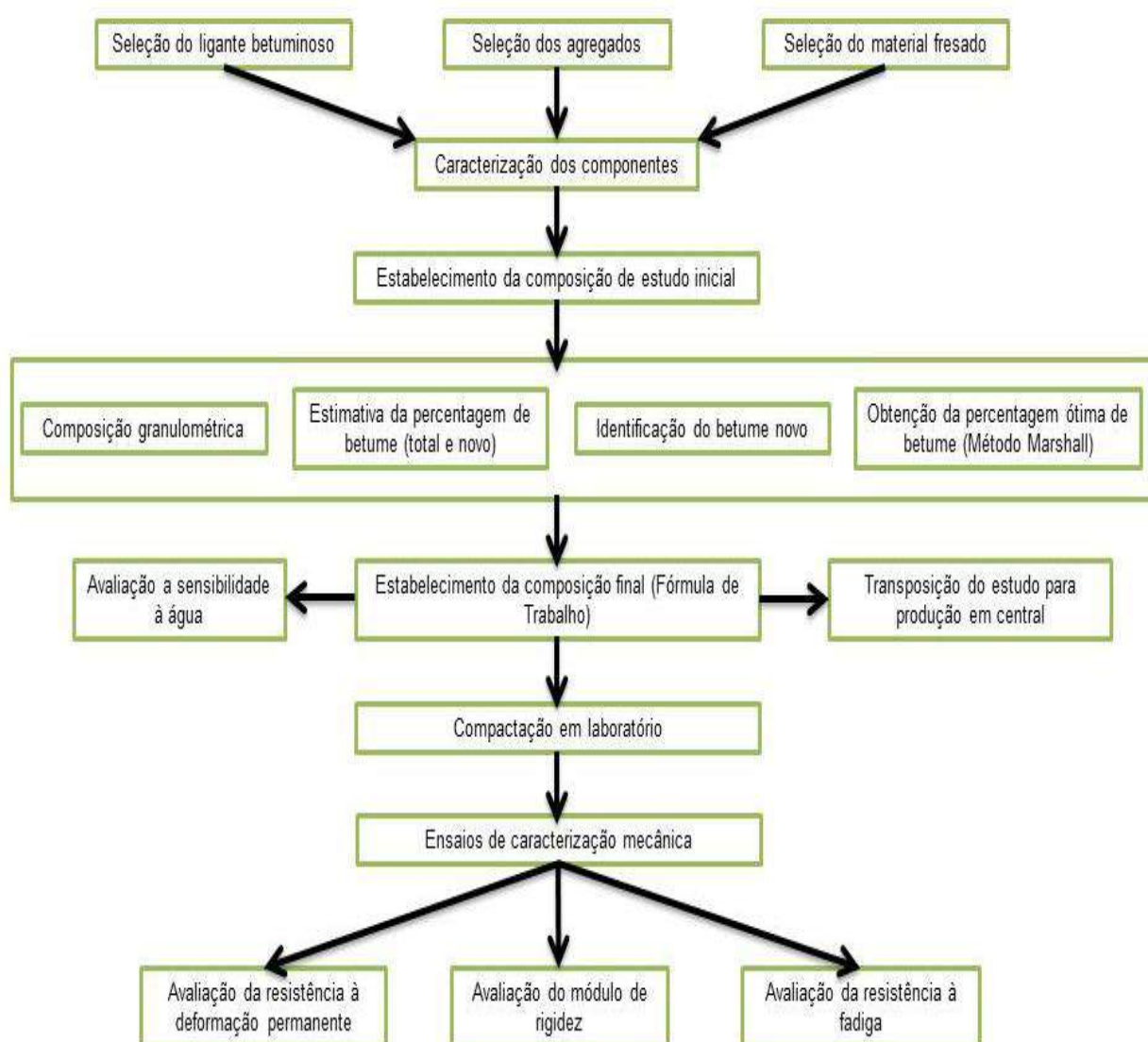


Figura 3. 1 - Fluxograma dos trabalhos experimentais.

Doravante, a designação da mistura betuminosa com as diferentes taxas de reciclagem é a apresentada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Nomenclatura das misturas betuminosas estudadas.

Nome da mistura betuminosa	Designação da mistura betuminosa
AC 20 base 35/50 (MB)	MB1
AC 20 base 35/50 (MB) com 10% de fresados	MB2
AC 20 base 35/50 (MB) com 20% de fresados	MB3

Os materiais utilizados no presente estudo podem dividir-se em dois tipos: o material resultante da fresagem de pavimentos, contendo agregado e betume envelhecidos, e os agregados e ligante betuminoso novos (‘virgens’) a incorporar na mistura. Para um melhor conhecimento do material fresado, como complemento, no Anexo A é apresentado um breve historial do referido material para apurar a dispersão de resultados que dele advém.

Quanto à proveniência destes materiais, o material fresado a reincorporar encontra-se devidamente armazenado nas instalações de Évora, os agregados virgens são provenientes da pedreira da empresa em Évora, e o betume virgem é fornecido pela CEPISA (no Anexo B constam as declarações de desempenho dos agregados e dos betumes usados).

Para efeitos da sua caracterização final, a produção da mistura é feita a quente em central contínua da empresa, instalada em Évora, e compactada em laboratório. Esta central tem um tambor secador/ misturador com anel incorporador a meio do tambor para entrada do material fresado e uma cabine a partir da qual se monitoriza toda a operação. As características da central são apresentadas no Quadro 3.2 e a mesma é ilustrada na Figura 3.2.

Quadro 3.2 - Características da central de produção de misturas betuminosas da empresa.

Central	Características
<u>Modelo:</u> TSM-21  <u>Marca:</u> Marini-Ermont	- Contínua, com anel incorporador meio do tambor
	- Misturas quentes e semi-quentes
	- Caudal: 140-360 ton/hora
	- Reciclagem até 35% de RAP



Figura 3. 2 - Central de produção de misturas betuminosas da empresa, em Évora.

### 3.3 Caracterização dos materiais constituintes

#### 3.3.1 Caracterização dos agregados novos

Os agregados devem estar em conformidade com a norma de produto EN 13043 - *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas*.

Para realização dos diversos testes sobre misturas betuminosas e seus constituintes foi realizada uma amostragem de material na Central de Évora, recolhendo e reduzindo as amostras representativas de agregados britados, de acordo com a norma NP EN 932-1.

É dever do produtor inspecionar e ensaiar os agregados britados novos mediante a utilização de procedimentos detalhados no plano da qualidade e de acordo com um plano em conformidade com os requisitos constantes na NP EN 13108-21 - *Controlo de Produção em Fábrica*.

No presente trabalho, dá-se atenção à análise granulométrica uma vez que são os ensaios efetuados com maior frequência. No caso dos ensaios com periodicidade menor serão considerados os valores médios declarados nas declarações de desempenho dos produtos fornecidas pelo produtor.

#### → Granulometria – NP EN 933-1

A necessidade de definir as curvas granulométricas pelos novos peneiros EN levou ao ajuste das curvas granulométricas anteriormente definidas para os peneiros ASTM. Os peneiros a utilizar segundo a EN 13043 pertencem à série base + série 2:

4mm; 6,3mm; 8mm; 10mm; 12,5mm; 14mm; 16mm; 20mm; 31,5mm

A estes juntam-se, segundo a norma NP EN 933-2, os peneiros de menores dimensões:



0,063mm; 0,125mm; 0,250mm; 0,500mm; 1mm; 2mm

No âmbito deste trabalho foram determinadas as curvas granulométricas dos agregados pelo método definido na norma NP EN 933-1, ou seja, peneiração com lavagem para determinação da fração fina por diferença de massa, seguida de peneiração da fração acima do peneiro de lavagem (normalmente com abertura de 0,063mm) nos peneiros das séries ISO base+2.

Após a sua lavagem e secagem em estufa a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  até massa constante, peneira-se um material em diversas frações granulométricas delimitadas por aberturas sucessivas e decrescentes. O material retido em cada peneiro é pesado e relacionado com a massa inicial da amostra. Com a percentagem acumulada do material passado é possível a construção da curva granulométrica que clarifica a distribuição das partículas por tamanhos, possibilitando mais facilmente detetar a falta de partículas de determinada dimensão, caso exista.

### 3.3.2 Caracterização do material fresado

A identificação e classificação do material fresado seguem os requisitos especificados na norma NP EN 13108-8 juntamente com a série de normas EN 12697 e a especificação LNEC E472.

Foram colhidas amostras representativas do material fresado para a realização dos ensaios de caracterização, cujos resultados são resumidos nos pontos seguintes.

#### → Presença de matéria estranha

A determinação da presença, conteúdo e tipo de qualquer matéria estranha efetua-se de acordo com a norma EN 12697-42, deve ser documentada e a respectiva categoria declarada.

A matéria estranha pode dividir-se em dois principais grupos:

- **Grupo 1** – Betão e argamassas, tijolos, metais.
- **Grupo 2** – Materiais sintéticos, madeira, plásticos.

dos quais dependem a classificação do material fresado nas seguintes categorias:

- **Categoria F<sub>1</sub>** – conteúdo de material do Grupo 1 inferior a 1% e material do Grupo 2 inferior a 0,1%;
- **Categoria F<sub>2</sub>** – conteúdo de material do Grupo 1 inferior a 5% e material do Grupo 2 inferior a 0,1%;
- **Categoria F<sub>dec</sub>** – conteúdo e natureza de todas as matérias estranhas declaradas.

#### → Percentagem de ligante

O método a usar para a determinação da percentagem de ligante presente no material fresado tem por base a incineração daquele, segundo a norma EN 12697-39, em mufla ventilada, calculando-se o valor a partir da diferença de pesos inicial e final do provete.

O cálculo da percentagem de ligante do material fresado é feito através da expressão:

$$P_b = \frac{M_b}{M_i} \times 100 \quad (3.1)$$

$$M_b = M_i - M_f \quad (3.2)$$

Onde,  $M_i$  é a massa inicial da mistura [g];  $M_f$  é a massa final do agregado após incineração [g];  $M_b$  é a massa do ligante (betume) [g];  $P_b$  é a percentagem de betume [%].

Contudo, e visto existir possibilidade de parte dos materiais finos serem incinerados juntamente com o betume, faz-se uma correção na percentagem de betume obtida. Este valor adotado resultou de estudos de calibração realizados previamente no laboratório com agregados do mesmo tipo, que é obtido pela média da diferença entre a percentagem de ligante real e a percentagem de ligante medida pela mufla a partir de 3 determinações.

#### → Recuperação do betume

A recuperação do betume existente no material fresado faz-se pelo método do evaporador rotativo, seguindo o procedimento presente na norma EN 12697-3, contemplando três fases.

A primeira fase corresponde à lavagem do material desagregado através do uso de tolueno. Para isso, são usados cerca de 7kg de material e colocados numa centrífugadora (Figura 3.3),

onde é adicionado 1 litro de tolueno, deixando repousar durante 30 minutos, tendo sempre o cuidado de verificar se todo o material está submerso no solvente. Em seguida, é feita um processo de vários ciclos de extração do tolueno da centrífugadora (contendo resíduos de betume) e colocação novamente na centrífugadora. Terminada a lavagem, é colocado 0,5 litros de tolueno novo e realizados vários ciclos até extração total do betume (separação total dos agregados). Desta fase, resulta uma mistura de tolueno, betume e alguns finos.

A segunda fase corresponde à separação entre a parte líquida (tolueno e betume) e a parte sólida (finos), resultante da fase anterior. Para tal, recorre-se a uma centrífugadora onde a rotação deve atingir 3000 rotações por minuto (rpm).

A terceira fase corresponde à separação entre o tolueno e o betume através de um processo de condensação usado no evaporador rotativo (Figura 3.4).



Figura 3. 3 - Recuperação do betume: (a) centrífugadora; (b) colocação do filtro e material fresado na centrífugadora; (c) lavagem do material fresado com tolueno (d) parte líquida resultante da lavagem (tolueno+betume).



Figura 3. 4 - Evaporador rotativo.

Após o processo de recuperação do betume, procede-se à avaliação da granulometria do material, à realização do ensaio de penetração a 25°C e à determinação da temperatura de amolecimento pelo método “Anel e Bola” para caracterização do betume.

#### → **Granulometria**

A granulometria do agregado recuperado (Figura 3.5) segue a norma NP EN 933-1.



Figura 3. 5 - Ensaio de granulometria ao material fresado.

A designação do material fresado depende da sua composição granulométrica, nomeadamente:

- Diâmetro máximo da mistura (U) – U é a menor dimensão, em mm, do peneiro em que passam 100% das partículas das misturas betuminosas recuperadas;
- Menor dimensão do agregado da mistura betuminosa recuperada (d) – o valor de d corresponde à menor dimensão do agregado da mistura betuminosa recuperada;
- Dimensão máxima do agregado da mistura betuminosa recuperada (D) – o valor de D é o maior de dois valores, determinados com base na análise granulométrica realizada e anteriormente apresentada:
  - a.  $M/1,4$ , onde M é o peneiro de menor dimensão onde passa 100% da massa do agregado recuperado;
  - b. Menor dimensão do peneiro onde passa 85% da massa do agregado recuperado.

Posto isto, o material fresado deve ser designado quanto à sua granulometria pela abreviatura RA e pelos valores anteriores, do seguinte modo:

**$U \text{ RA } d/D \text{ (mm)}$**

#### → Caracterização do betume

##### **Ensaio de penetração, a 25°C**

Este ensaio tem por objetivo a medição indireta da viscosidade do betume e segue a norma EN 1426.

Após a colocação do betume em recipientes, inicia-se o ensaio deixando cair uma agulha com peso de 100 gramas sobre o betume durante 5 segundos a 25°C e verifica-se a profundidade de penetração, sendo esta registada em décimas de milímetro (x0,1mm).

##### **Determinação da temperatura de amolecimento – Método de “Anel e Bola”**

Este ensaio tem por objetivo a determinação do ponto de amolecimento do betume, seguindo a norma EN 1427, que permite ter uma ideia da temperatura até à qual o betume mantém a sua estabilidade quando em serviço.

Após a colocação de duas amostras de betume em dois anéis, colocam-se duas esferas metálicas sobre estas, mergulhadas em água com um suporte adequado. Esta é aquecida (5°C por minuto) até que o betume se torne menos viscoso e toque na parte inferior do suporte por ação do peso das esferas.

Nos casos em que determinado lote inclua predominantemente material fresado contendo betume asfáltico, as propriedades do ligante devem ser declaradas segundo uma das seguintes opções:

- Categoria  $P_{15}$ , se a penetração de cada uma das amostras for igual ou superior a 10 ( $\times 10^{-1}$  mm) e a média de todas as amostras for igual ou superior a 15 ( $\times 10^{-1}$  mm);
- Categoria  $S_{70}$ , se a temperatura de amolecimento do ligante de cada uma das amostras não exceder 77°C e se a média de todas as amostras não exceder 70°C;
- Categoria  $P_{dec}$  ou  $S_{dec}$ , para o caso de outro material fresado

### 3.4 Betume novo a usar na mistura betuminosa

No estudo de misturas betuminosas com incorporação de material fresado, como é o caso do presente trabalho, a seleção do tipo de betume virgem tem de levar em conta as características do betume recuperado do material fresado, cuja contribuição para as características do betume na mistura betuminosa final pode ser modelada pelas expressões definidas no Anexo A da norma NP EN 13108-1:

→ **Penetração do ligante:**

$$a \times \log(pen_1) + b \times \log(pen_2) = (a + b) \times \log(pen_{mix}) \quad (3.3)$$

Onde,  $Pen_{mix}$  é a penetração do ligante da mistura contendo misturas betuminosas recuperadas [ $\times 0,1$ mm];  $Pen_1$  é a penetração do ligante recuperado [ $\times 0,1$ mm];  $Pen_2$  é a penetração do ligante novo [ $\times 0,1$ mm];  $a$  e  $b$  são proporções dos ligantes na mistura, em massa, correspondentes ao ligante das misturas betuminosas recuperadas ( $a$ ) e ao ligante novo ( $b$ ) na mistura;  $a+b=1$

→ **Temperatura de amolecimento do ligante:**

$$T_{mix} = a \times T_1 + b \times T_2 \quad (3.4)$$

Onde,  $T_{mix}$  é a temperatura de amolecimento do ligante na mistura contendo misturas betuminosas recuperadas;  $T_1$  é a temperatura de amolecimento do ligante recuperado [°C];  $T_2$  é a temperatura de amolecimento do ligante novo [°C];  $a$  e  $b$  são proporções dos ligantes na mistura, em massa, correspondentes ao ligante das misturas betuminosas recuperadas ( $a$ ) e ao ligante novo ( $b$ ) na mistura;  $a+b=1$

Posteriormente à escolha da classe do betume novo é determinada a penetração do betume de acordo com a norma EN 1426, e a temperatura de amolecimento segundo o método do “anel e bola” de acordo com a norma EN 1427, sendo os resultados avaliados segundo as especificações declaradas pelo fabricante do betume.

Tal como referido, para se saber qual o betume novo a juntar à mistura é necessário saber qual a contribuição do betume do material fresado na sua composição final, consoante a taxa de reciclagem a usar. Assim sendo, a classe do betume novo de partida é igual à classe final pretendida, 35/50. Caso não cumpra os requisitos, usa-se a classe seguinte, 50/70.

Nos Quadros 3.3 e 3.4 são apresentados os valores de penetração e temperatura de amolecimento do fornecedor (Cepsa) para o betume 35/50 e 50/70, respectivamente.

Quadro 3.3 - Penetração e temperatura de amolecimento da amostra de betume virgem 35/50.

Betume 35/50	Certificado de análise	Especificação
Penetração (x0,1mm)	44,0	35 – 50
Temp. de amolecimento (°C)	51,4	50 – 58

Quadro 3.4 - Penetração e temperatura de amolecimento da amostra de betume virgem 50/70.

Betume 50/70	Certificado de análise	Especificação
Penetração (x0,1mm)	52,0	50 – 70
Temp. de amolecimento (°C)	49,4	46 – 54

### **3.5 Formulação da mistura betuminosa**

O estudo de formulação tem como função determinar a percentagem de betume virgem que deverá estar presente na mistura final tendo em conta, quando for o caso, o betume presente no material fresado, e pode ser dividido em duas fases: a primeira, contempla a definição granulométrica da mistura de agregados britados virgens e reciclados, garantindo o cumprimento do fuso respectivo definido pelo CEEP (Estradas de Portugal, 2012); a segunda, diz respeito à determinação da percentagem ótima de betume para a mistura em análise, com base no estudo Marshall, de acordo com as recomendações do Anexo Nacional da norma NP EN 13108-1.

Primeiramente, é feita uma formulação da mistura betuminosa – AC 20 base 35/50 (MB) sem incorporação de material fresado, a partir da qual se determinam todas as características para obtenção da percentagem ótima de betume, efetuando-se ainda alguns ensaios relevantes para a sua caracterização geométrica, física e mecânica. Após esta determinação, são feitas mais duas formulações da mistura betuminosa com a incorporação de material fresado com as percentagens de 10% e 20%.

#### **3.5.1 Composição granulométrica da mistura**

Com vista a obter um bom enquadramento no fuso granulométrico recomendado pelo CEEP, é estabelecida a mistura de agregados novos e material fresado tendo determinadas à partida, as percentagens de material fresado a incorporar. O fuso granulométrico definido pelo CEEP para misturas AC 20 base (MB) é apresentado numericamente no Quadro 3.5.



Quadro 3.5 - Fuso granulométrico (numérico) da mistura AC 20 base (MB) definido no CEEP.

#peneiros (mm)	Limite inferior	Limite superior
31,5	100	100
20	90	100
12,5	57	86
4	34	49
2	26	41
0,5	12	26
0,125	4	14
0,063	2	7

### 3.5.2 Caracterização geométrica, física e mecânica da mistura de agregados

Além da granulometria foram realizados ensaios de caracterização geométrica, física e mecânica sobre a mistura de agregados para verificação do cumprimento destas características segundo o CEEP.

A massa volúmica e absorção de água foram determinadas com base na norma NP EN 1097-6, o equivalente de areia e o ensaio do azul-de-metileno com base nas normas NP EN 933-8 e NP EN 933-9, respectivamente, o índice de achatamento com base na norma NP EN 933-3, o coeficiente micro-Deval e o coeficiente Los Angeles com base nas normas NP EN 1097-1 e NP EN 1097-2, respectivamente.

### 3.5.3 Estudo Marshall

A norma EN 12697-34 define o método de ensaio para determinação dos valores relativos à estabilidade, deformação e quociente Marshall de provetes de misturas betuminosas, produzidas em conformidade com a norma EN 12697-35 e preparadas com o compactador de impacto segundo o método de ensaio definido na norma EN 12697-30.

A partir de um valor ótimo expectável de ligante para este tipo de mistura betuminosa (4,5%), definido no Anexo Nacional à norma NP EN 13108-1, é considerado um conjunto de misturas betuminosas com a mesma composição e com as variações da percentagem de ligante de -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0%. Estas misturas serão utilizadas em estudo Marshall para aferição da percentagem ótima em betume para esta composição.

São preparadas as quantidades necessárias de cada fração de agregados e de betume para o fabrico da mistura. No caso de incorporação de material fresado, tem-se em conta o seu contributo de betume na percentagem final requerida através da seguinte expressão:

$$\frac{\%betume_{mix}}{100} = \% mat. reciclado \times \% betume_{MF} + \% mat. novo \times \% betume_{novo} \quad (3.5)$$

Seguidamente, o betume novo é aquecido numa placa elétrica a uma temperatura de cerca de 160°C, e os agregados aquecidos em estufa durante um período superior a 8 horas.

Após os materiais se encontrarem à temperatura adequada, é efetuada a amassadura dos mesmos garantindo a homogeneidade da mistura, numa taça metálica com o auxílio de uma colher e colocados em moldes, todos previamente aquecidos à mesma temperatura (Figura 3.6).

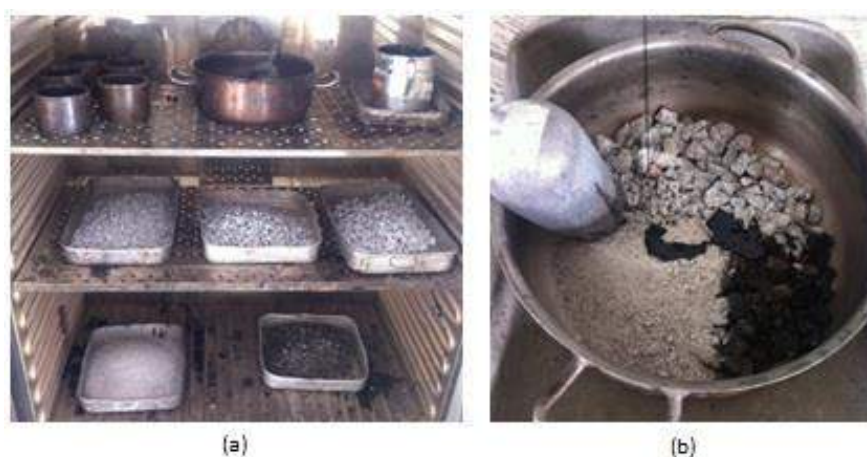


Figura 3. 6 - Preparação das misturas betuminosas com diferentes percentagens de betume para determinação da percentagem ótima. (a) pré-aquecimento dos materiais e utensílios; (b) mistura dos componentes da mistura.

No estudo Marshall é necessário produzir, no mínimo, três provetes para cada percentagem de ligante, com cerca de 63mm de altura e 101mm de diâmetro, por impacto com 75 pancadas em cada face sob condições especificadas no Anexo A da norma NP EN 13108-1 (Figura 3.7).



Figura 3. 7 - Preparação de provetes para o estudo Marshall. (a) enchimento dos moldes; (b) compactador de impacto; (c) nº de pancadas de ensaio; (d) desmolde dos provetes; (e) altura dos provetes; (f) diâmetro dos provetes.

Para cada mistura betuminosa foram preparados 4 provetes para cada percentagem de ligante com as medidas especificadas anteriormente e, aproximadamente, 1,2kg (Foto 3.8) para a realização do estudo Marshall.

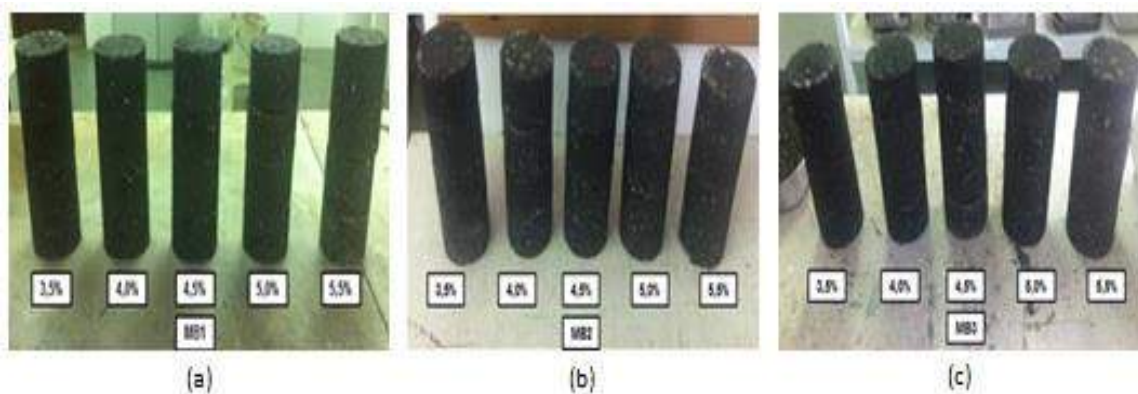


Figura 3. 8 - Provetes para o estudo Marshall: (a) MB1; (b) MB2; (c) MB3.

→ **Baridade aparente**

A norma EN 12697-6 define o método de ensaio para determinação da baridade aparente (BA) de um provete betuminoso compactado, que pode ser obtido de várias formas, cuja escolha depende do teor calculado e da acessibilidade de vazios no provete. O método escolhido é o provete saturado com a superfície seca (SSD) – método B.

De acordo com este método, determina-se a massa do provete seco ( $M_1$ ) e a massa volúmica da água à temperatura de ensaio ( $\rho_w$ ), imergindo o provete no banho de água a uma temperatura de ensaio conhecida até esta o saturar, durante um período de tempo suficiente até a massa do provete não sofrer alteração (aproximadamente 30 minutos). Em seguida, determina-se a massa do provete saturado quando imerso ( $M_2$ ) e depois de removê-lo da água pesa-se ao ar após secagem superficial do provete ( $M_3$ ). A baridade aparente é dada pela expressão:

$$\rho_{SSD} \text{ ou } BA = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (3.6)$$

Onde,  $\rho_{SSD}$  ou BA é a baridade do provete com superfície seca [ $\text{kg/m}^3$ ];  $M_1$  é a massa do provete seco [g];  $M_2$  é a massa do provete imerso em água [g];  $M_3$  é a massa do provete saturado com a superfície seca [g];  $\rho_w$  é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio [ $\text{kg/m}^3$ ]

→ **Baridade Máxima Teórica**

A norma EN 12697-5 especifica o método de ensaio para determinação da baridade máxima teórica (BMT) de uma mistura betuminosa. Especifica um procedimento volumétrico, um procedimento hidrostático e um procedimento matemático. No procedimento escolhido, procedimento volumétrico, o volume da amostra é determinado através do volume de água (ou outro solvente com densidade bem conhecida) ocupado pela amostra dentro de um picnómetro.

A amostra é colocada no picnómetro de vácuo, à qual se junta água, e submete-se a uma força de vácuo durante 15 minutos, aproximadamente, que permite a entrada de água dentro da amostra não compactada, preenchendo todos os vazios da mesma. A baridade máxima teórica é dada através da expressão:

(3.7)

$$\rho_{mv} \text{ ou } BMT = \frac{M_2 - M_1}{1000 \times V_p - \left( \frac{M_3 - M_2}{\rho_w} \right)}$$

Onde,  $\rho_{mv}$  ou  $BMT$  é a baridade máxima teórica [ $\text{kg/m}^3$ ];  $M_1$  é o peso do picnómetro [g];  $M_2$  é o peso do picnómetro com amostra [g];  $M_3$  é o peso do picnómetro com amostra e cheio de água [g];  $V_p$  é o volume do picnómetro [ $\text{m}^3$ ];  $\rho_w$  é a densidade da água [ $\text{kg/m}^3$ ]

A baridade máxima teórica, conjuntamente com a baridade, é utilizada para calcular a porosidade e outras propriedades volumétricas de uma mistura betuminosa compactada para cada percentagem de betume usada nos provetes Marshall. Os métodos de ensaio descritos nesta norma podem ser usados com misturas betuminosas desagregadas.

#### → Características de vazios

A norma EN 12697-8 define um procedimento para o cálculo de duas características volumétricas de um provete betuminoso compactado: a porosidade ( $V_m$ ) e a percentagem de vazios no agregado mineral (porosidade sem betume) (VMA). A porosidade de um provete betuminoso é calculada utilizando a baridade máxima teórica da mistura e da baridade do provete. A percentagem de vazios no agregado mineral de um provete betuminoso preenchido com betume é calculada a partir da percentagem de ligante, dos vazios do agregado mineral, da baridade do provete e da massa volúmica do ligante.

A porosidade e o VMA são dados pelas expressões:

$$V_m = \frac{BMT - BA}{BMT} \times 100\% \quad (3.8)$$

Onde,  $V_m$  é a porosidade da mistura [%];  $BMT$  é a baridade máxima teórica [ $\text{kg/m}^3$ ];  $BA$  é a baridade aparente [ $\text{kg/m}^3$ ]

$$VMA = V_m + P_{bp} \times \left( \frac{BA}{\gamma_b} \times 100\% \right) \quad (3.9)$$

Onde,  $VMA$  é o volume de vazios do agregado [%];  $V_m$  é a porosidade da mistura [%];  $BA$  é a baridade aparente [ $\text{kg/m}^3$ ];  $P_{bp}$  é a percentagem de betume presente no provete [%];  $\gamma_b$  é o peso específico do betume [ $\text{kg/m}^3$ ].

Estas características volumétricas podem ser utilizadas como critério de formulação das misturas ou como parâmetros da sua avaliação após colocação e compactação nos pavimentos. Este método é adequado para provetes preparados em laboratório ou obtidos por carotagem após colocação e compactação da mistura no pavimento.

#### → Estabilidade e Deformação Marshall

No ensaio Marshall são determinadas as características Marshall de estabilidade e deformação decorrentes, respectivamente, da força aplicada e da deformação sofrida por um provete sob condições normalizadas.

Os provetes de mistura betuminosa, que devem estar a uma temperatura de 60°C obtida por imersão em banho-maria, são comprimidos diametralmente. Para isso, são colocados na vertical no estabilómetro e comprimidos segundo o seu diâmetro a uma velocidade constante de 50mm/min, levando-os à rotura. A força máxima medida no momento da rotura é designada por 'estabilidade Marshall' (afetada pelo fator de correção) e caracteriza a resistência mecânica da mistura, enquanto que a deformação máxima na rotura se designa por 'deformação Marshall'.

A carga máxima atingida representa a estabilidade da mistura apenas nos casos em que a altura do provete é igual a 63,5mm. Quando tal não acontece, é aplicado um fator corretivo à medição da altura média dos provetes dada pela expressão, segundo a norma EN 12697-34:

$$c = 5,2e^{-0,0258 \times h} \quad (3.10)$$

c – fator corretivo a aplicar à altura média dos provetes; h – altura do provete [mm]

#### → Determinação da percentagem ótima de betume

No final, a percentagem ótima de betume da mistura betuminosa em estudo, é determinada a partir dos seguintes gráficos, segundo a norma NP EN 13108-1:

- Percentagem de betume / Baridade
- Percentagem de betume / Porosidade
- Percentagem de betume / Estabilidade

A percentagem ótima de betume da mistura é determinada como a média das percentagens de ligante para as quais se obteve, no estudo, o valor máximo de baridade, o valor máximo da estabilidade e o valor médio de porosidade entre os limites definidos para esse tipo de mistura pelo Anexo Nacional à norma NP EN 13108-1. Nesta determinação podem ser levados em conta outros parâmetros, cujo cumprimento para a percentagem ótima de betume da mistura seja exigido em cláusulas técnicas.

### **3.6 Caracterização do desempenho das misturas betuminosas**

Alcançada a percentagem ótima de betume a adicionar na mistura betuminosa, é composta a fórmula de trabalho para cada mistura estudada, em termos de percentagens de cada material constituinte; é avaliada a sua sensibilidade à água e transposta para central para a sua produção, o que implica a concordância com o sistema de crivos adotado. As misturas betuminosas produzidas em central são compactadas em laboratório consoante os ensaios a realizar.

No final, as misturas betuminosas são avaliadas para verificação da sua conformidade com os requisitos, nomeadamente: a granulometria, características Marshall, resistência à deformação permanente, rigidez e resistência à fadiga, sendo os resultados desta caracterização apresentados no capítulo seguinte.

#### **3.6.1 Preparação dos provetes**

Como foi atrás referido, as misturas betuminosas são compactadas por dois métodos de acordo com os ensaios a realizar. No caso da avaliação da sensibilidade à água e características Marshall é usada a compactação Marshall; para obtenção dos respectivos provetes Marshall, e no caso dos restantes ensaios a compactação com o auxílio do compactador de rolo (do inglês *Roller Compactor*) (Figura 3.9), pois este é dos únicos capazes de produzir em laboratório placas (lajes) e compactá-las com dimensões diversas, dependendo das dimensões do rolo, das quais por serragem se extraem vários provetes prismáticos (vigas). As amostras são mantidas num molde metálico, onde a espessura final pretendida varia consoante a mistura betuminosa.



Nota: trata-se do modelo 77-B3602 da marca *Controls* com moldes de compactação 400x300x120 mm.

Figura 3. 9 - Compactador de rolo.

O compactador de rolo impõe uma espessura exata pré-definida, o que implica que o utilizador terá por base a baridade da mistura betuminosa, através de 30 ciclos de carga incremental de 3 – 10 – 16 – 22 – 28 kN. As placas são compactadas segundo a EN 12697-33.

Nesta fase, após arrefecimento da mistura, são desmoldadas e cortadas em laboratório cinco placas de cada mistura betuminosa com 300 x 400 x 80mm, apesar de constar na norma EN 12697-22 uma espessura de 60mm para agregados com dimensão máxima entre 16-22mm e 80mm para agregados com dimensão máxima entre 22-32mm. Esta decisão deve-se ao facto, da serragem das placas para obtenção dos provetes prismáticos, para ensaio de rigidez e fadiga, ser um processo delicado para o qual se atingiu uma margem de segurança de 20mm.

Das cinco placas obtidas, duas são utilizadas no ensaio à deformação permanente e três para serrar nove provetes prismáticos (vigas) para os ensaios de rigidez e fadiga com 400 x 60 x 60mm (Figura 3.10). Depois de devidamente preparados, os provetes têm um tempo de cura, no interior de uma câmara climática a 15°C, durante um período mínimo de 2 dias para o ensaio de pista e, durante um período superior a duas semanas e inferior a dois meses para o ensaio de rigidez e fadiga (Figura 3.10).





Figura 3. 10 - Preparação dos provetes para os ensaios de desempenho: (a) enchimento do molde para compactação; (b) compactação da mistura betuminosa; (c) desmoldagem das placas; (d) serragem das placas; (e) provetes prismáticos (vigas); (f) acondicionamento dos provetes

### 3.6.2 Ensaio de sensibilidade à água

A norma EN 12697-12 define um método de ensaio para determinação do efeito da saturação acelerado em água na resistência à tração indireta de provetes cilíndricos de misturas betuminosas – avaliação da sensibilidade à água (ITSR) – pelo método A.

Neste ensaio um grupo de seis provetes cilíndricos é moldado utilizando o compactador de impacto (EN 12697-30), sob 75 pancadas em ambas as faces, sendo determinadas as suas dimensões e baridade (de acordo com o método saturado com superfície seca – método B, estabelecido na norma EN 12697-6 – Anexo A). Estes provetes têm um tempo de cura entre 16h e 24h antes de se iniciar o acondicionamento.

Os provetes são divididos em dois grupos com características semelhantes, em termos de altura e baridade. Os dois grupos assim formados, são acondicionados, durante o ensaio de,

em condições distintas, designando-se um primeiro grupo por provetes ‘secos’ e o outro por provetes ‘molhados’.

Os valores médios destas características, determinados para cada conjunto não devem exceder os valores de 5mm e de 15kg/m<sup>3</sup>, diferenças entre as alturas médias e as baridades médias dos grupos, respectivamente.

Desta forma, o subgrupo ‘molhados’ é colocado dentro do picnómetro e saturado com água, sendo-lhe aplicado vácuo, através de pressão controlada de 6,7±0,3 kPa durante 30±5 minutos, seguido de meia hora de repouso em água. De seguida, medem-se as suas dimensões para garantir que não excedem mais do que 2% do seu volume.

Depois, o subgrupo ‘molhados’ é colocado em banho-maria à temperatura de 40°C por um período de 68 a 72 horas, enquanto que o subgrupo ‘secos’ é mantido seco à temperatura ambiente sobre uma superfície plana.

No final do acondicionamento, ambos os subconjuntos são conduzidos a 15±5°C durante 2h, e a resistência à tração indireta de cada um dos subgrupos é determinada em conformidade com a norma europeia EN 12697-23, através da expressão:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100\% \quad (3.11)$$

Onde, *ITSR* é a resistência à tração indireta (sensibilidade à água do provete) [%]; *ITS<sub>w</sub>* é a resistência à tração indireta de provetes cilíndricos molhados [kPa]; *ITS<sub>d</sub>* é a resistência à tração indireta de provetes cilíndricos secos [kPa].

Em Portugal, antes da introdução das normas europeias, utilizava-se a norma Militar Americana MIL-STA-620A. No entanto, os países pertencentes à Comunidade Europeia têm vindo a adotar gradualmente a norma Europeia EN 12697-12. Neste trabalho, considera-se pertinente realizar a avaliação da sensibilidade à água segundo as duas normas e verificar, de uma forma breve, quais as principais diferenças.

O quociente entre a resistência média dos provetes acondicionados em condições mais severas e a resistência média dos provetes acondicionados em condições menos severas fornece uma “resistência conservada”, que é utilizada como indicador da sensibilidade à água (Batista e Antunes, 2009).

Deste modo, procede-se à determinação da resistência conservada em tração indireta, segundo a norma militar americana MIL-STD-620A reformulada pelo CEEP. Esta prevê a moldagem de um conjunto de provetes utilizando o compactador de impacto (EN 12697-30) e sujeitos a imersão por 24h em banho-maria a 60°C – provetes ‘molhados’. Estes são sujeitos a determinação da estabilidade Marshall, e um valor médio é determinado para este conjunto. O índice de resistência conservada (IRC) é dado pela razão entre o valor médio dos provetes ensaiados à estabilidade Marshall com condicionamento em banho-maria a 60°C por 40 minutos, designado por conjunto dos provetes ‘secos’, e o valor médio dos provetes ‘molhados’ através do quociente entre a resistência do subgrupo condicionado em água e resistência do subgrupo seco, expressa em termos de percentagem.

$$IRC = \frac{S_{molhados}}{S_{secos}} \times 100\% \quad (3.12)$$

Onde,  $IRC$  é o índice de resistência conservada [%];  $S_{molhados}$  é a estabilidade Marshall dos provetes molhados [kN];  $S_{secos}$  é a estabilidade Marshall dos provetes secos [kN].

### 3.6.3 Ensaio de resistência à fadiga e rigidez

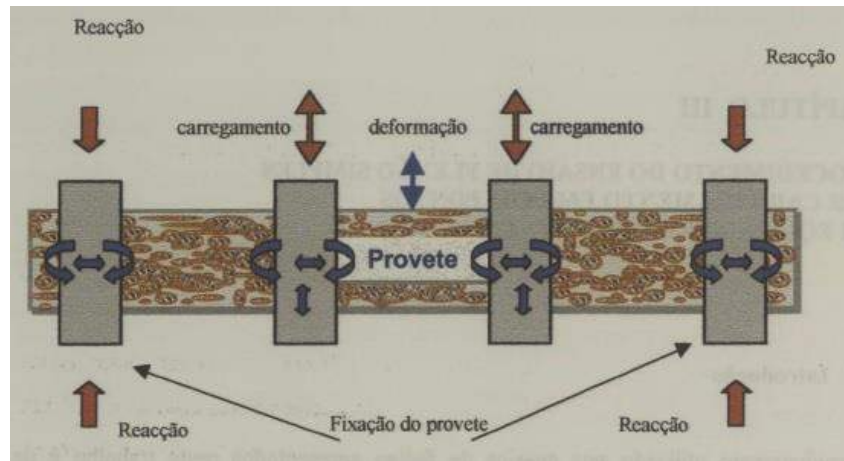
Para obtenção da rigidez e resistência à fadiga dos provetes foi realizado um ensaio de flexão a peças prismáticas apoiadas em quatro pontos (*4-point bending test to prismatic species* (4PB-PR)), num equipamento constituído por um sistema hidráulico (Figura 3.11).



Nota: a máquina de ensaio é o modelo *Four-Point Bending Apparatus* da marca *IPC Global*, acompanhada do software para computador *UTS 018 Four-Point Bending Test*.

Figura 3. 11 - Equipamento de ensaio de flexão apoiada em 4 pontos (4PB-PR).

Neste ensaio é considerado comportamento mecânico do tipo visco-elástico. É imposta uma curvatura a um provete prismático apoiado em quatro pontos, com rotação e translação horizontal livres (dois pontos de aplicação de cargas, centrais, e dois pontos de reação, exteriores), como ilustrado na Figura 3.12. A curvatura é concretizada pelo movimento dos pontos de aplicação de cargas na direção vertical perpendicularmente ao eixo longitudinal do provete, permanecendo fixas as posições dos dois extremos. Esta configuração leva a que, entre os dois apoios centrais, se estabeleçam esforço transversal nulo e momento fletor constante (logo, uma extensão constante), como se pode ver na Figura 3.13. A secção está sujeita unicamente a tensões axiais. O deslocamento aplicado é periódico, sinusoidal e simétrico em torno do zero. A amplitude de deslocamento deve ser constante em função do tempo.



Nota: Na figura está indicado a vermelho o carregamento e reações e a azul os deslocamentos.

Figura 3. 12 - Esquema de ensaio à fadiga por flexão em quatro pontos (Teixeira, 2000).

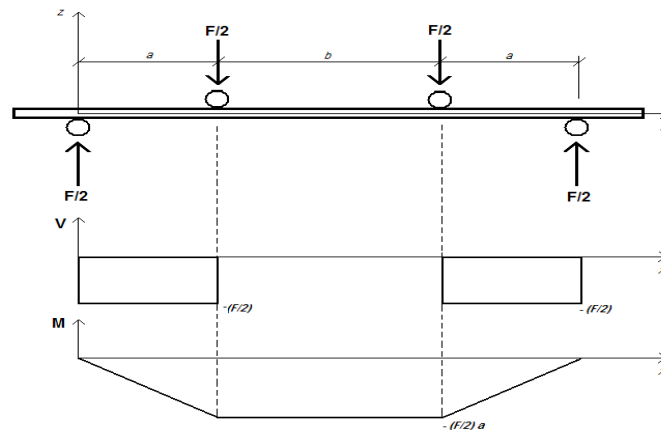


Figura 3. 13 - Esquema dos esforços do ensaio à fadiga por flexão em quatro pontos.

Durante o teste, são medidos em função do tempo a força necessária para deformação do provete, o deslocamento e o desfasamento entre ambos os sinais. A partir daí são determinados o módulo de rigidez e as características de fadiga do provete (sobre determinadas condições de temperatura e frequência de aplicação da carga).

Existem dois modos principais de realizar o 4PB-PR:

- extensão controlada (*controlled strain*): a extensão mantém-se constante ao diminuir a tensão durante o teste. Este tipo de teste é associado a pavimentos convencionais flexíveis, onde as propriedades de recuperação elástica do material são importantes no que concerne à vida à fadiga. Normalmente a rotura é definida como uma redução de 50% no módulo inicial (Figura 3.14);

- tensão controlada (*controlled stress*): a tensão mantém-se constante, o que faz aumentar a extensão durante o teste. Este tipo de teste é associado a pavimentos relativamente espessos, onde a rigidez elevada é o parâmetro fundamental no que concerne à vida à fadiga. Normalmente a rotura é definida como uma redução de 10% no módulo inicial.

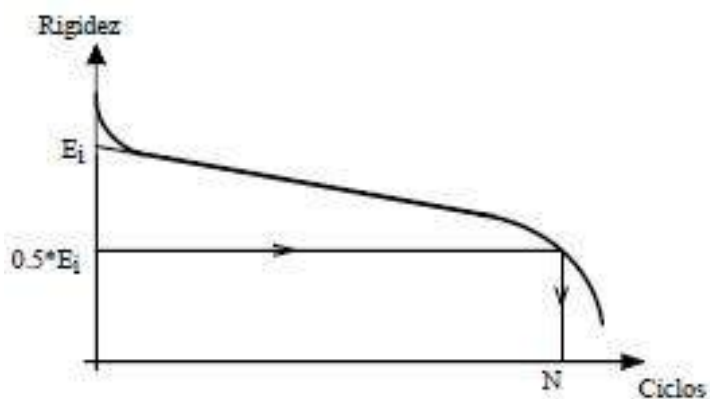


Figura 3. 14 - Definição da rotura em ensaios de flexão com extensão controlada (Pais e Palha,2000).

Na Figura 3.15 são apresentadas a evolução típica da tensão e da extensão controlada, em ensaios de fadiga.

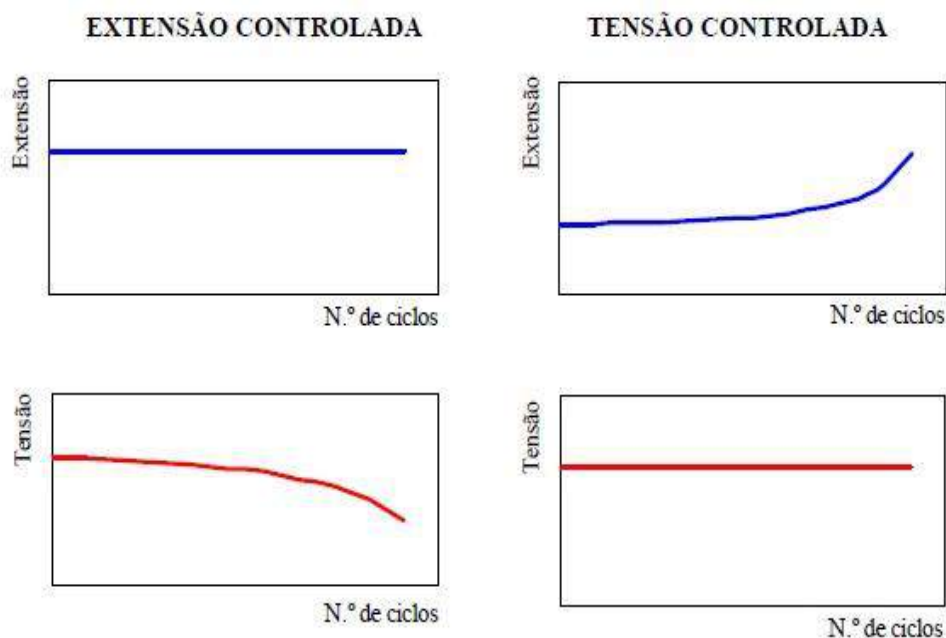


Figura 3. 15 - Evolução típica da tensão e extensão controladas em ensaios de fadiga (Baptista, 2006).

No presente trabalho é usado o primeiro caso, de extensão controlada, onde é medida a deformação máxima a meio vão do provete, sendo para cada ciclo de carga, ajustado o valor da força máxima aplicada para que o provete experimente sempre a mesma extensão de tração, previamente definida (Teixeira, 2000).

A temperatura utilizada é de 20°C e a frequência de solicitação de 10Hz, que corresponde aproximadamente a uma velocidade real de rolamento do veículo que aplica a carga de 60km/h, habitualmente usada neste tipo de estudos e adequada para a avaliação da resistência à fadiga, onde a ruína é definida pelo número de ciclos correspondente a um valor de módulo de rigidez da viga igual 50% do seu valor inicial (Neves et al, 2012; Baptista, 2006).

Antes do início do ensaio, pela norma NP EN 13108-20, o acondicionamento do provete é feito no interior do equipamento de ensaio durante 1h a uma temperatura de 20°C.

#### → Rigidez

De modo a conhecer o módulo de rigidez das misturas determinado após o equipamento hidráulico de ensaio efectuar 100 ciclos, as vigas preparadas anteriormente são ensaiadas a uma temperatura e frequência pré-estabelecidas. Em cada ensaio é realizado um varrimento de frequências (1; 2; 3; 5; 8; 10; 20; 30; 1 Hz) considerando uma extensão imposta de 50µm/m, de acordo com a norma EN 12697-26, que especifica o método de ensaio para a caracterização da rigidez de misturas betuminosas através de ensaios de flexão apoiada em quatro pontos, preconizado na metodologia SHRP e usado com alguma expressão em Portugal.

Este procedimento é utilizado para classificar as misturas betuminosas com base na rigidez, servindo de guia para o desempenho do pavimento de modo a obter dados para estimar o seu comportamento estrutural. Este ensaio corresponde à primeira parte do ensaio à fadiga (considerado o pré-teste da fadiga).

No final do ensaio regista-se os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase, para se analisar a evolução de ambos os parâmetros, correspondendo este último ao desfasamento entre as tensões e as deformações.

→ **Fadiga**

A norma EN 12697-24 define que, para dadas frequência e temperatura, o ensaio de fadiga deve ser realizado com pelo menos 3 níveis de extensão diferentes com um mínimo de 6 repetições por nível num número de ciclos entre  $10^4$  e  $2 \times 10^6$ . No entanto, de acordo com (Pais e Palha, 2010), quanto ao número de ensaios, verifica-se que a utilização de 3 ensaios por nível de extensão parece conduzir a um valor da vida à fadiga compatível com as exigências associadas à análise de pavimentos, pelo que a obtenção de uma lei de fadiga apenas deve ser realizada recorrendo ao ensaio de, pelo menos, 2 níveis de extensão (um alto e um baixo), ensaiando-se 3 provetes em cada nível. Em (Teixeira, 2000), o autor também utiliza apenas 3 provetes (ensaios) em 3 níveis de extensão. Assim sendo, dada a disponibilidade de meios, neste trabalho são usados 3 provetes em cada um dos 4 níveis de extensão.

Com a realização do ensaio a vários provetes, para diferentes níveis de extensão (350µm/m, 300µm/m, 250 µm/m e 200 µm/m), é possível determinar a lei de fadiga do material, resultado da relação entre a extensão imposta e o número de aplicações de carga no ponto em que se atinge a ruína. Esta lei é materializada a partir de uma curva, obtida por regressão linear dos resultados dos provetes ensaiados, expressa por (Pais e Palha, 2010):

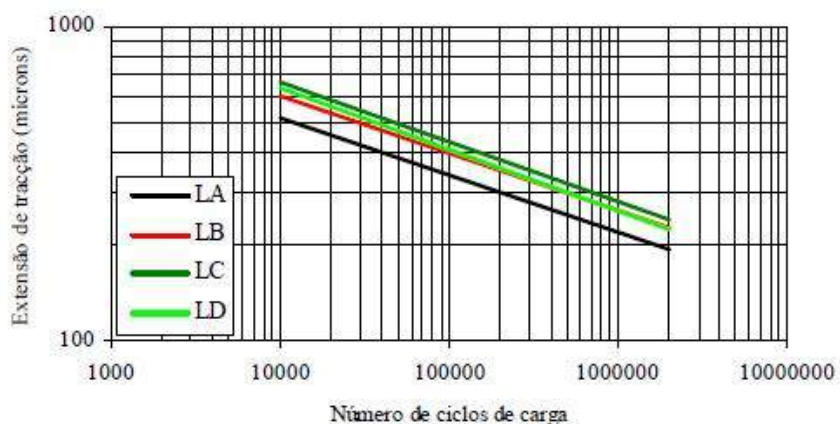
$$\varepsilon = a \times N^{-b} \quad (3.15)$$

Onde,  $\varepsilon$  é a amplitude da extensão de tração inicial (µm/m);  $N$  é a vida à fadiga (número de ciclos até se atingir a ruína);  $a$  e  $b$  são os coeficientes obtidos experimentalmente através de regressão linear (função do tipo de material, condições de ensaio e critério de ruína).

Para a realização dos ensaios utiliza-se um computador, ligado à unidade de controlo, no qual se encontra instalado um programa de cálculo automático que permite programar o ensaio e registar todos os valores medidos pelo equipamento de flexão.

De acordo com (Baptista, 2006), o desenvolvimento esperado dos resultados para misturas do mesmo tipo que o do presente trabalho é apresentado na Figura 3.16.





(NOTA: LA – macadame betuminoso; LB – macadame com 20%; LC – macadame com 30%; LD – macadame com 40%.)

Figura 3. 16 - Resultados dos ensaios de fadiga expressos em leis de fadiga (Baptista, 2006).

### 3.6.4 Ensaio de resistência à deformação permanente

Para avaliar a resistência à deformação permanente, de entre vários, recorreu-se ao ensaio de pista *Wheel Tracking Test* (WTT) (Figura 3.17) em função do tamanho do equipamento (pequeno, grande ou extra grande) e com condicionamentos ao ar ou em água.

Nota: a máquina de ensaio é o modelo 77-B502 da marca *Controls* com espaçadores de 400 x 300 x 100 mm, acompanhada do software para computador *Dyna-Soft*.



Figura 3. 17 - Equipamento para ensaio de pista – small size device.

Antes do ensaio, pela norma NP EN 13108-20, o acondicionamento das placas para o ensaio de pista é feito no interior do equipamento de ensaio durante 6h a uma temperatura de 60°C.

A norma EN 12697-22 – procedimento B (ensaio com equipamento pequeno e condicionamento ao ar) descreve o método de ensaio supradito, para determinar a suscetibilidade de materiais betuminosos para deformar sob carga, que tem em consideração a temperatura de ensaio de 60°C, a força de 700N, com uma frequência de 0,42Hz sendo aplicados 10 000 ciclos de carga, de onde resulta a profundidade média do cavado da rodeira ( $RD_{AIR}$ ) e a taxa de deformação em ensaio de pista ( $WTS_{AIR}$ ), cuja expressão de cálculo é apresentada em seguida:

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5} \quad (3.13)$$

Onde  $d_{5000}$  e  $d_{10000}$  correspondem à profundidade da rodeira após 5000 e 10000 ciclos, respectivamente, em mm.

O ensaio termina quando concluídos os ciclos estabelecidos ou atingida a profundidade de 20mm de rodeira. Após a sua conclusão, são determinadas as baridades dos provetes pelo procedimento B – provetes saturados com superfície seca da norma NP EN 12697-6 através da expressão (3.6), e pelo procedimento D – baridade geométrica, da mesma norma pela expressão:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_{seca}}{B \times H \times L} \quad (3.14)$$

Onde,  $\rho_{b,dim}$  é a baridade geométrica do provete [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $m_{seca}$  é a massa seca medida à temperatura ambiente [kg];  $B$ ,  $H$ ,  $L$  são a largura, altura e comprimento, respectivamente, do provete [mm].

Segundo (Gardete, 2006), o resultado esperado deste tipo de ensaio é apresentado na Figura 3.18.

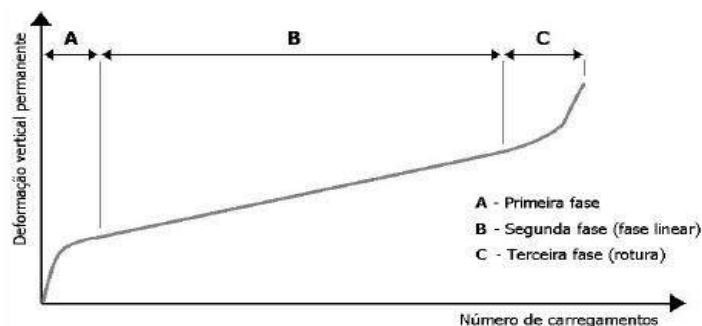


Figura 3. 18 - Evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (Gardete, 2006).

## 4. Apresentação e Discussão de Resultados

### 4.1 Caracterização dos materiais constituintes

#### 4.1.1 Caracterização dos agregados novos

Segundo o CEEP, uma mistura betuminosa deve conter na sua composição, pelo menos, três frações granulométricas diferentes. Para este estudo, e sendo este um processo iterativo, optou-se por considerar inicialmente a possibilidade de adicionar quatro tipos de agregados com dimensões distintas.

Deste modo, para a realização dos diversos testes sobre os agregados novos foi realizada uma amostragem de material na Central de Évora, recolhendo e reduzindo as amostras representativas dos agregados britados (Figura 4.1). A designação granulométrica, proveniência e natureza geológica dos agregados novos utilizados no fabrico da mistura betuminosa é apresentada no Quadro 4.1.



Figura 4.1 - Agregados novos.

Quadro 4.1 - Designação granulométrica, proveniência e natureza geológica dos agregados novos.

Designação do Agregado	Proveniência	Natureza
Areão 0/4	Pedreira de Monte das Flores (Évora)	Granítica
Brita 4/10		
Brita 10/14		
Brita 12/20		

### → Granulometria

O resultado da análise granulométrica de cada agregado é apresentado na Figura 4.2, cujos valores numéricos são apresentados no Anexo C.

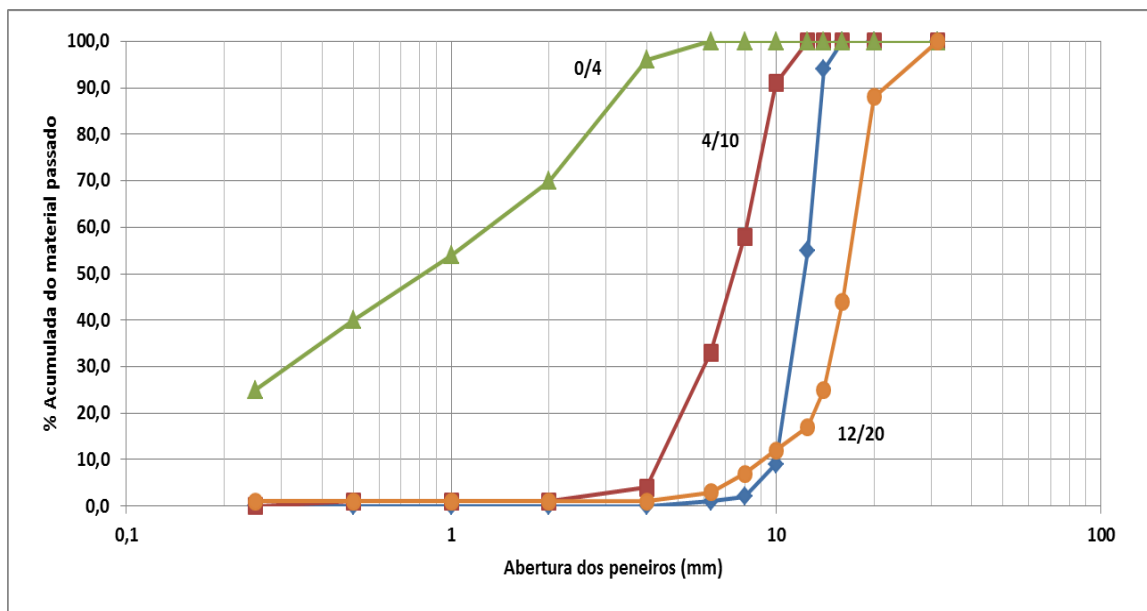


Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados britados novos componentes da mistura betuminosa.

As curvas granulométricas dos agregados novos cumprem os intervalos estabelecidos nas declarações de desempenho de cada produto.

#### 4.1.2 Caracterização do material fresado

Da mesma forma que para os agregados novos, também foi colhida uma amostra representativa do material fresado para a realização dos ensaios para a sua caracterização, cujos resultados são expostos nos pontos seguintes.

### → Presença de matéria estranha

O material fresado, depois de inspecionado visualmente, foi classificado como F<sub>1</sub>.

→ **Preparação da amostra**

Após a recolha da amostra de material fresado (Figura 4.3), foi necessária a sua secagem, uma vez que estava húmido devido às condições de armazenamento. Para tal, e de modo a não alterar as características do mesmo, optou-se por espalhar o material num tabuleiro e deixá-lo secar à temperatura ambiente dentro do laboratório durante 24h. De seguida, foi esquartelado para garantir uma melhor representatividade.



Figura 4.3 - Material fresado.

→ **Percentagem de ligante**

A amostra de material de fresado, depois de colocada na mufla e incinerada a 500°C (Figura 4.4), apresentou uma percentagem de betume de 4,4%.



Figura 4.4 - Amostra de material fresado incinerada.

### → Granulometria

Depois da extração do betume existente no material fresado, procedeu-se à análise granulométrica do mesmo. A granulometria do agregado recuperado (Figura 4.4), apresentada na Figura 4.5, e numericamente no Anexo C, depois de analisada deu origem à designação do lote de material fresado como 20 RA 0/14 mm.

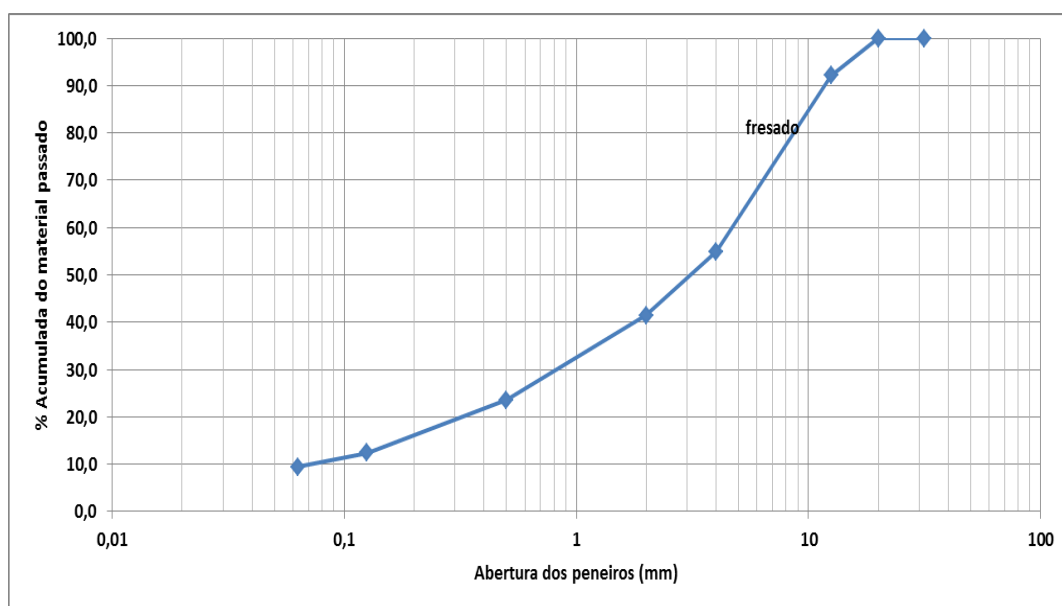


Figura 4.5 - Curva granulométrica do material fresado.

### → Caracterização do betume

De modo a caracterizar o ligante existente no material fresado fez-se a recuperação do betume no evaporador rotativo e, sobre este, determinou-se a sua penetração a 25°C e o ponto de amolecimento pelo método do “anel e bola” (Figura 4.6). Como esperado, os resultados obtidos presentes no Quadro 4.2, revelam um betume endurecido de baixa penetração e temperatura de amolecimento elevada.

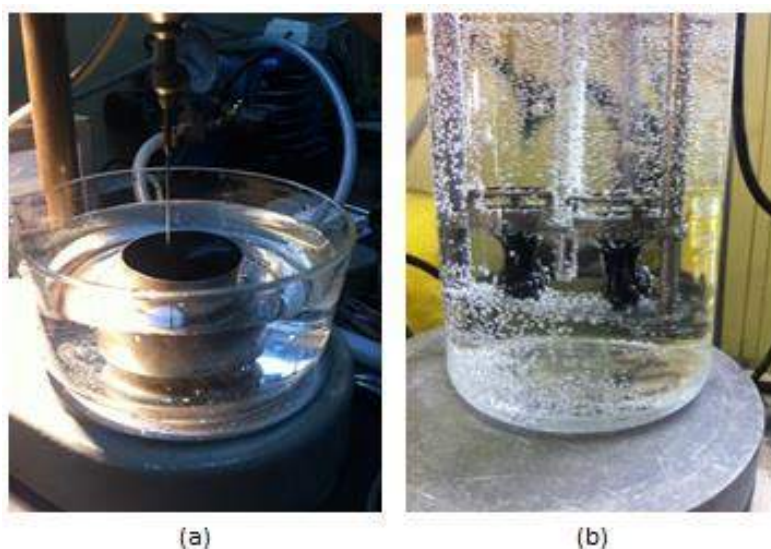


Figura 4. 6 - Caracterização do betume: (a) penetração no betume (b) temperatura de amolecimento do betume.

Quadro 4.2 - Características do betume recuperado do material fresado.

	Penetração a 25°C, 100g, 5seg ( $\times 10^{-1}\text{mm}$ )	Temperatura de anel e bola (°C)
1ª Determinação	17	77,7
2ª Determinação	18	77,9
3ª Determinação	18	-
Média	18	78

Os valores obtidos permitem caracterizar o material fresado como  $P_{15}$ , uma vez que a penetração média obtida é superior a 15 ( $\times 0,1\text{mm}$ ).

#### 4.2 Betume a usar na mistura betuminosa

Uma vez sabida a taxa de reciclagem a usar, foi necessária a seleção do betume novo a adicionar à mistura tendo como partida a mesma classe de betume final pretendida, 35/50. Para tal, recorreu-se às Equações 3.3 e 3.4, para saber qual a penetração e temperatura de amolecimento, respectivamente, da mistura resultante entre o betume novo e o betume presente do material fresado a partir das suas características previamente conhecidas.

Assim, usando o betume 35/50 conclui-se que para a mistura MB2 o betume juntamente com a contribuição do betume do material fresado cumprem os requisitos da especificação para a classe 35/50 para a mistura betuminosa final, nomeadamente penetração e temperatura de amolecimento:

$$\text{Pen}_{\text{mix}}=37 (\times 10^{-1})\text{mm e } T_{\text{mix}}=54^{\circ}\text{C}$$

No caso da mistura MB3, a mistura do betume 35/50 com o material fresado cumpre os requisitos da temperatura de amolecimento mas não cumpre os requisitos de penetração:

$$\text{Pen}_{\text{mix}}=31 (\times 10^{-1})\text{mm e } T_{\text{mix}}=57^{\circ}\text{C}$$

Pelo que é necessário o uso de betume da classe de 50/70:

$$\text{Pen}_{\text{mix}}=35 (\times 10^{-1})\text{mm e } T_{\text{mix}}=55^{\circ}\text{C}$$

Deste modo, usou-se o betume 35/50 na mistura MB2 e o betume 50/70 na mistura MB3.

#### 4.3 Formulação da mistura betuminosa

Com base nas granulometrias das frações dos agregados constituintes da mistura, foram determinadas as proporções de cada agregado a adotar, com vista a obter um bom enquadramento no fuso granulométrico constante na norma NP EN 13108-1 e recomendado pelo CEEP.

As percentagens dos materiais a incorporar em cada mistura betuminosa, a partir das quais se construíram as respectivas curvas granulométricas de estudo que melhor se ajustam de forma regular, são apresentadas no Quadro 4.3. Na Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 são ilustradas as curvas granulométricas de cada estudo enquadradas no fuso do CEEP, cujos valores numéricos estão presentes no Anexo D.

Quadro 4.3 - Percentagem de cada agregado a incorporar na mistura betuminosa.

<b>Agregado</b>	<b>MB1</b>	<b>MB2</b>	<b>MB3</b>
Areão 0/4	47%	43%	37%
Brita 4/10	15%	19%	16%
Brita 10/14	24%	18%	16%
Brita 12/20	14%	10%	11%
Fresados	-	10%	20%
<b>Total</b>	100%	100%	100%



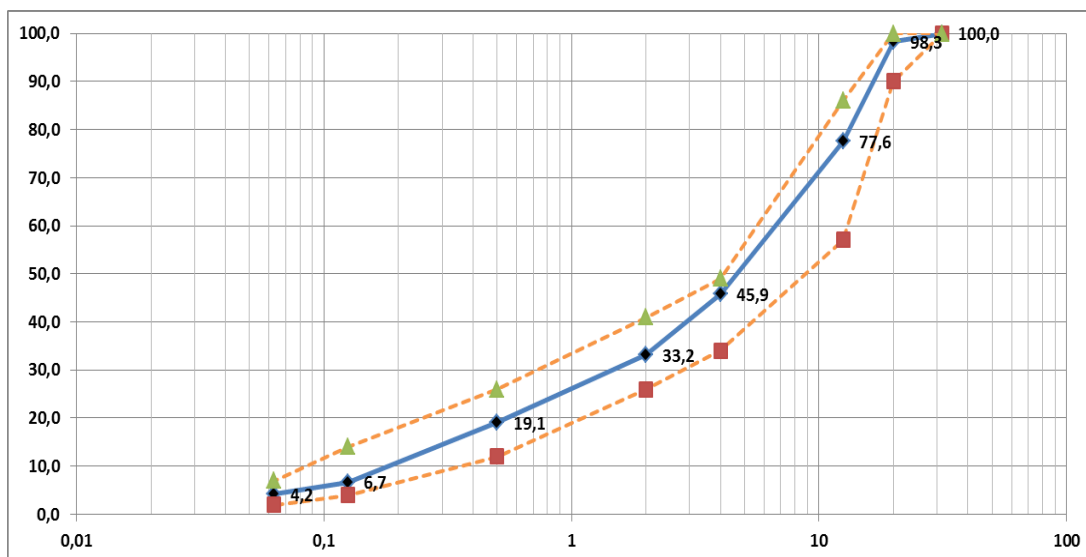


Figura 4.7 - Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso definido (MB1).

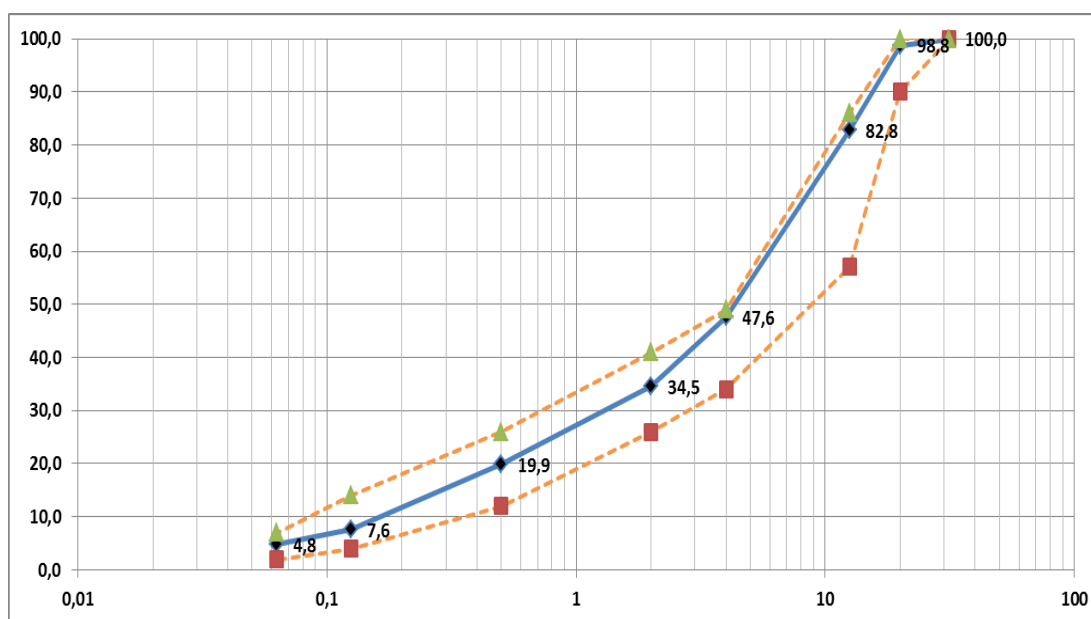


Figura 4.8 - Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso definido (MB2).

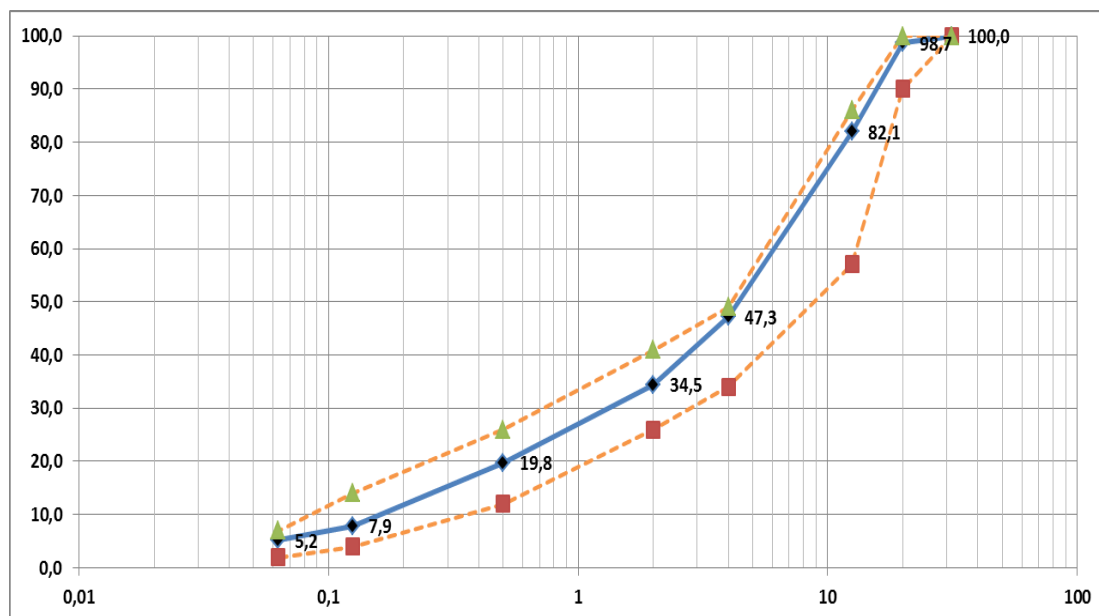


Figura 4.9 - Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso definido (MB3).

#### 4.4 Caracterização geométrica, física e mecânica sobre a mistura de agregados

Depois de realizados os ensaios de caracterização geométrica, física e mecânica à mistura de agregados da mistura MB1, os resultados são resumidamente apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios geométricos, físicos e mecânicos (MB1).

Ensaio	Resultados	Requisitos do CEEP
<b>Massa Volúmica (<math>\text{Mg/m}^3</math>)</b>	<#4mm:	$\rho_a=2,67$
		$\rho_{rd}=2,62$
		$\rho_{ssd}=2,64$
	>#4mm:	$\rho_a=2,63$
		$\rho_{rd}=2,61$
		$\rho_{ssd}=2,62$
<b>Absorção de água (%)</b>	<#4mm:	$WA_{24}=0,7$
	>#4mm:	$WA_{24}=0,3$
<b>Azul de metileno (g/kg)</b>	1,0	Max 2.0 g/kg
<b>Equivalente de areia (%)</b>	62	Min 55%
<b>Índice de Achatamento (%)</b>	12	Max 20%
<b>Fragmentação: Índice Los Angeles (%)</b>	30	Max 30%
<b>Desgaste: índice micro-Deval (%)</b>	11	Max 25%
$\rho_a$ é a massa volúmica do material impermeável das partículas; $\rho_{rd}$ é a massa volúmica do material impermeável das partículas secas em estufa; $\rho_{ssd}$ é a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca; $WA_{24}$ é a absorção de água.		

É de notar que os resultados obtidos nos ensaios cumprem os intervalos estabelecidos nas declarações de desempenho dos agregados. O valor do índice de Los Angeles está no limite dos requisitos. Tal poderá estar associado à natureza granítica dos agregados.

#### 4.5 Ensaio Marshall

No estudo pelo método de Marshall considerou-se a percentagem de betume de referência, e uma variação da percentagem de ligante de -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0%, resultando as percentagens de betume novo indicadas no Quadro 4.5, tendo em conta o contributo de betume do material fresado dado pela Equação 3.5.

Quadro 4.5 - Resultados do cálculo das percentagens de betumes.

% betume <sub>mix</sub>	MB2				MB3			
	Betume <sub>RA</sub>		Betume <sub>novo</sub>		Betume <sub>RA</sub>		Betume <sub>novo</sub>	
	% material	% betume	% material	% betume	% material	% betume	% material	% betume
3,5	10	4,4	90	3,4	20	4,4	80	3,3
4,0				4,0				3,9
4,5				4,5				4,5
5,0				5,1				5,2
5,5				5,6				5,8

Antes da execução dos provetes em laboratório, aqueceram-se os agregados e o betume a 160°C. Em relação ao material fresado, a melhor forma de simular a produção em central, em que o seu aquecimento é feito por condução, foi obtida aquecendo este material a uma temperatura na ordem dos 135°C (Baptista, 2006). De seguida, misturou-se manualmente durante o tempo necessário até que o agregado estivesse completamente envolvido pelo ligante.

A partir de cada mistura betuminosa foram produzidos 4 provetes para cada percentagem de ligante: provetes nº 1 a 4 (com 3,5% ligante), nº 5 a 8 (com 4,0% ligante), nº 9 a 12 (com 4,5% ligante), nº 13 a 16 (com 5,0% ligante) e nº 17 a 20 (com 5,5% ligante).

Os provetes cilíndricos foram compactados em moldes de base circular pela aplicação de 75 pancadas em cada face da amostra, sob condições normalizadas. As pancadas resultam da queda do pilão do compactador de impacto. Depois de compactados, deixaram-se os provetes nos moldes durante, aproximadamente, 24 horas. Passado este tempo de cura, desmoldaram-se os provetes.

Seguido o procedimento habitual, após o fabrico dos provetes é determinada a sua baridade aparente e a baridade máxima teórica, que dá origem ao cálculo da porosidade e o conteúdo de vazios na mistura de agregado (VMA). Por fim, depois de realizado o ensaio de compressão Marshall, a análise de resultados conduziu aos valores que se resumem nos quadros seguintes e que permitiram traçar as curvas representativas da variação das características das misturas com a percentagem de betume. Os resultados de ensaio de cada estudo Marshall são apresentados no Anexo E.

Quadro 4.6 - Resumo dos resultados do estudo Marshall (MB1).

Parâmetro	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
Baridade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2306	2334	2339	2323	2304
BMT (kg/m <sup>3</sup> )	2490	2481	2471	2450	2430
Porosidade (%)	7,4	5,9	5,4	5,2	5,2
VMA (%)	15,1	14,8	15,4	16,2	17,3
Estabilidade Marshall (kN)	12,9	13,8	13,9	13,4	12,4
Deformação Marshall (mm)	2,2	2,3	2,4	2,6	3,2

Quadro 4.7 - Resumo dos resultados do estudo Marshall (MB2).

Parâmetro	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
Baridade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2306	2342	2354	2350	2338
BMT (kg/m <sup>3</sup> )	2535	2511	2488	2467	2455
Porosidade (%)	9,0	6,7	5,4	4,8	4,8
VMA (%)	16,8	15,7	15,6	16,0	17,1
Estabilidade Marshall (kN)	14,9	15,7	16,3	15,4	15,0
Deformação Marshall (mm)	2,9	3,1	3,4	3,5	4,1

Quadro 4.8 - Resumo dos resultados do estudo Marshall (MB3).

Parâmetro	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
Baridade aparente ( $\text{kg/m}^3$ )	2314	2370	2377	2368	2355
BMT ( $\text{kg/m}^3$ )	2529	2507	2484	2468	2449
Porosidade (%)	8,5	5,5	4,4	3,9	3,8
VMA (%)	16,3	14,6	14,6	15,3	16,3
Estabilidade Marshall (kN)	14,7	16,2	16,9	16,5	16,1
Deformação Marshall (mm)	2,2	3,1	3,6	4,0	4,2

Deste modo, foi possível estimar a percentagem ótima de betume em função dos resultados obtidos no ensaio de Marshall (estabilidade e deformação) e nos resultados de baridade aparente, porosidade, volume de vazios no esqueleto de agregado (VMA) obtidos com a caracterização volumétrica dos provetes. Estes são apresentados graficamente nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, onde se ilustra a variação das propriedades referidas.

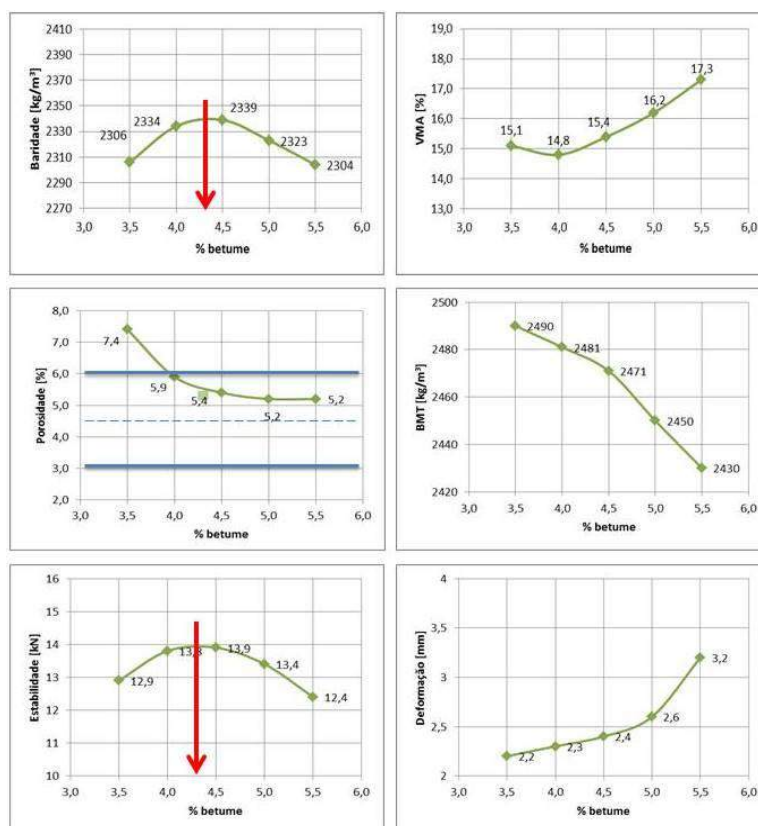


Figura 4.10 - Gráficos ilustrativos da variação, com a percentagem de betume, das principais propriedades determinadas no âmbito do estudo Marshall (MB1).

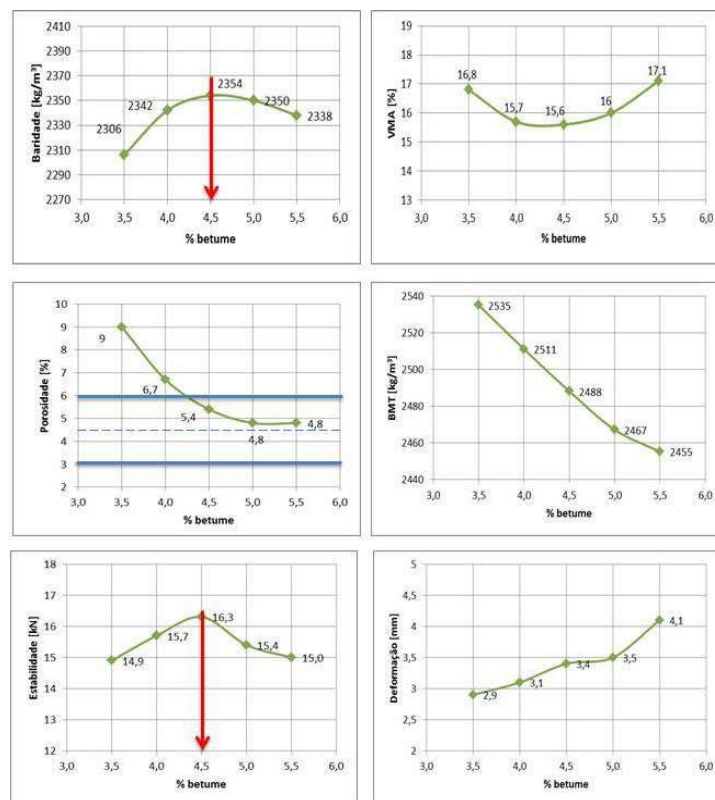


Figura 4.11 - Gráficos ilustrativos da variação, com a percentagem de betume, das principais propriedades determinadas no âmbito do estudo Marshall (MB2).

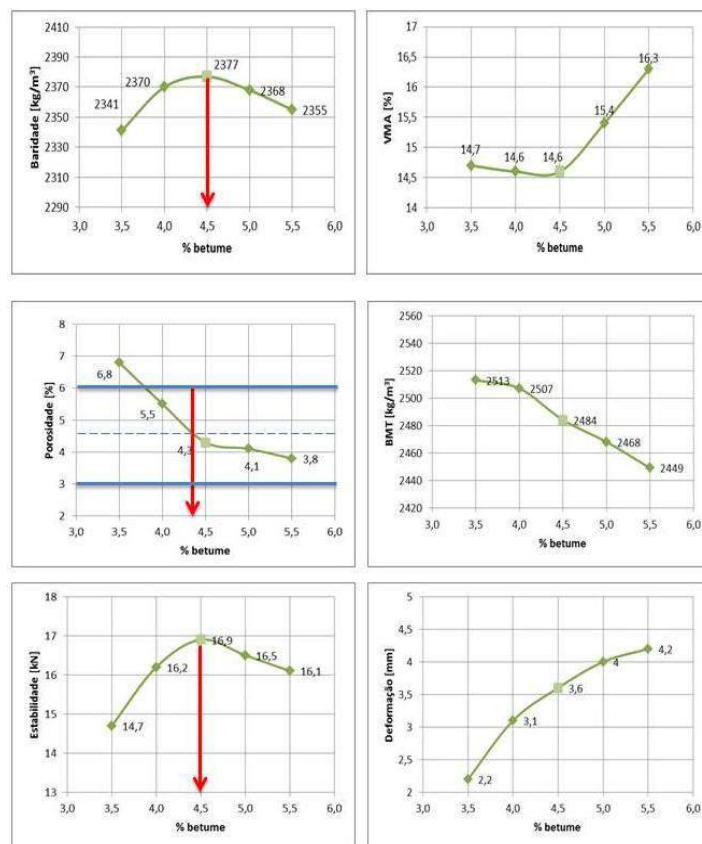


Figura 4.12 - Gráficos ilustrativos da variação, com a percentagem de betume, das principais propriedades determinadas no âmbito do estudo Marshall (MB3).

Da análise dos gráficos de cada figura conclui-se que a percentagem ótima de betume, valor para o qual se maximizam a baridade e a estabilidade, e pela interseção com a média da porosidade estabelecida, respeitando o valor mínimo estabelecido no CEEP, 3,5%, são apresentados no Quadro 4.9. No entanto, no caso das misturas MB1 e MB2 o valor médio dos intervalos da porosidade não interseção a curva de estudo, pelo que não se considerou a sua contribuição para a estimativa da referida percentagem.

Quadro 4.9 - Percentagem ótima de betume para as misturas betuminosas estudadas.

	% ótima de betume		
	MB1	MB2	MB3
% betume / baridade	4,3	4,5	4,5
% betume / porosidade	-	-	4,4
% betume / estabilidade	4,3	4,5	4,5
Média	4,3	4,5	4,5

Para aferição das características do ponto ótimo de cada mistura betuminosa, procedeu-se à moldagem de novos provetes de acordo com a mesma metodologia. Os resultados são apresentados no Quadro 4.10, e demonstrada a conformidade das características aos requisitos prescritos pelo CEEP.

Quadro 4.10 - Características obtidas do estudo Marshall para as percentagens ótimas de betume.

	MB1	MB2	MB3	Requisitos CEEP
% Betume	4,3	4,5	4,5	Min 3,5
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	2339	2354	2377	-
BMT (kg/m <sup>3</sup> )	2471	2488	2484	-
Porosidade (%)	5,3	5,4	4,3	3,0 – 6,0
VMA (%)	14,9	15,6	14,6	Min 14,0
Estabilidade (kN)	13,8	16,3	16,9	9,6 – 21,0 <sup>(1)</sup>
Deformação (mm)	2,5	3,4	3,6	2,0 – 4,0
Quociente (kN/mm)	5,5	4,8	4,7	Min 2,0

(1) Dada a natureza do material da pedra de Évora, cuja formação é de natureza granítica, assumem-se valores de estabilidade mais elevados que as classes da declaração de desempenho permitem, de acordo com o CEEP, onde se considera o limite máximo de 21 kN para “granitóides e rochas com elevada predominância de sílica na sua composição”.

Ainda da análise das Figuras 4.10 a 4.12, verifica-se que os gráficos têm o desenvolvimento esperado e todos os parâmetros cumprem os limites estabelecidos no CEEP, com exceção da porosidade e da deformação Marshall que exibem valores superiores a 6,0% e 4,0mm, respectivamente. No entanto, observando o Quadro 4.10, constata-se que os valores obtidos para a percentagem ótima de betume cumprem os limites normativos.

Dado o exposto, as fórmulas de trabalho para cada mistura betuminosa são apresentadas no Quadro 4.11 e a sua transposição para central apresentada no Quadro 4.12.

Quadro 4.11 - Fórmulas de trabalho das misturas betuminosas.

Componente		MB1 (%)	MB2 (%)		MB3 (%)	
Areão 0/4		45,0	41,0		35,3	
Brita 4/10		14,4	18,1		15,3	
Brita 10/14		23,0	17,2		15,3	
Brita 12/20		13,4	9,6		10,5	
Betume 35/50		4,3	4,1		-	
Betume 50/70		-	-		3,6	
Fresados	Betume	-	0,4	10%	0,9	20%
	Agregados		9,6		19,1	
TOTAL		100%	100%		100%	

Quadro 4.12 - Transposição das fórmulas de trabalho para central.

	MB1		MB2		MB3	
	Estudo (%)	Central (%)	Estudo (%)	Central (%)	Estudo (%)	Central (%)
<b>Areão 0/4</b>	45,0	47,0	41,0	43,0	35,3	37,0
<b>Brita 4/10</b>	14,4	15,0	18,1	19,0	15,3	16,0
<b>Brita 10/14</b>	23,0	24,0	17,2	18,0	15,3	16,0
<b>Brita 12/20</b>	13,4	14,0	9,6	10,0	10,5	11,0
<b>Fresados</b>	-	-	10,0	10,0	20,0	20,0
<b>Betume 35/50</b>	4,3	4,3	4,1	4,1	-	-
<b>Betume 50/70</b>	-	-	-	-	3,6	3,6
<b>(% betume final)</b>	<b>(4,3)</b>		<b>(4,5)</b>		<b>(4,5)</b>	
<b>Total (%)</b>	100,0	104,3	100,0	104,5	100,0	104,5
NOTA: amassadura: agregados+fresados(+fíler)=100%						

Depois da produção em central, foram colhidas amostras representativas de cada mistura betuminosa, aferidas as suas características e enquadradas nos requisitos do CEEP. O Quadro 4.13 apresenta as características referidas.



Quadro 4.13 - Características das misturas betuminosas estudadas depois de produzidas em central.

	<b>MB1</b>	<b>MB2</b>	<b>MB3</b>	<b>Requisitos EP</b>
<b>% betume</b>	4,4	4,4	4,5	Min 3,5
<b>Baridade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2344	2362	2364	-
<b>BMT (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2467	2474	2471	-
<b>Porosidade (%)</b>	5,4	4,5	4,4	3,0 – 6,0
<b>VMA (%)</b>	16,1	14,6	15,7	Min 14,0
<b>Estabilidade (kN)</b>	15,1	19,6	19,5	9,6 – 21,0 <sup>(1)</sup>
<b>Deformação (mm)</b>	4,7	3,9	4,1	2,0 – 4,0
<b>Quociente (kN/mm)</b>	3,2	3,9	4,8	Min 2,0
<b>Relação fíler/betume</b>	1,1	1,1	1,2	1,1 – 1,5
<i>(1) Para granitóides e agregados provenientes de rochas com predominância de sílica na sua composição, a estabilidade máxima deverá ser 21 kN.</i>				

#### 4.6 Caracterização do desempenho das misturas betuminosas

Todos os ensaios mencionados nos subcapítulos que se seguem são realizados sobre provetes produzidos com a percentagem ótima de betume de cada mistura, apresentado no Quadro 4.11. Para a moldagem dos provetes dos ensaios de desempenho, com exceção dos provetes cilíndricos para avaliação da sensibilidade à água que foram produzidos e compactados em laboratório, a mistura produzida em central foi aquecida em estufa a 140°C e de seguida compactada.

Um dos maiores problemas no decurso dos trabalhos experimentais foi o corte de energia no laboratório que, por sua vez, interrompeu alguns ensaios em curso. Este facto deve-se à localização do laboratório ser na pedreira de Rio Maior, o que faz com que haja uma maior oscilação no fornecimento elétrico ao mesmo.

##### 4.6.1 Sensibilidade à água

Os provetes cilíndricos para a realização do ensaio foram produzidos e compactados de acordo com os padrões normalizados definidos no subcapítulo 3.5.3 e o acondicionamento dos mesmos foi feito de acordo com o subcapítulo 3.6.2. O Quadro 4.14 apresenta as características volumétricas correspondentes aos provetes de ensaio.

Quadro 4.14 - Características volumétricas dos provetes ao ensaio ITSr.

Características	MB1		MB2		MB3	
	Provetes Secos	Provetes Molhados	Provetes Secos	Provetes Molhados	Provetes Secos	Provetes Molhados
Altura (mm)	62,9	64,0	65,4	64,4	62,8	64,7
Baridade média (kg/m <sup>3</sup> )	2325	2337	2335	2345	2347	2352
Porosidade (%)	5,8	5,3	5,6	5,2	5,0	4,8

Todos os provetes de ensaio apresentam dimensões dentro do intervalo 101,6±0,1mm de diâmetro e 63±2,5mm de altura, pelo que os provetes molhados não aumentaram mais de 2% em volume aquando do seu acondicionamento no picnómetro de vácuo.

Analisando o quadro anterior, verifica-se que os provetes apresentam, aproximadamente, as mesmas dimensões e baridade, sendo que a diferença de alturas médias e de baridades médias entre os dois grupos de provetes não excedeu, respectivamente, 5mm e 15 kg/m<sup>3</sup>, tal como determina a norma.

Após a rotura dos provetes, verificou-se que os agregados do grupo ‘secos’ se encontravam mais fraturados que os do grupo ‘molhados’, o que significa que a ligação entre agregado e betume não é tão eficaz devido ao acondicionamento em água dos provetes molhados.

No Quadro 4.15 estão presentes os resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água (ITSr) para cada mistura, sendo os mesmos apresentados graficamente na Figura 4.15.

Quadro 4.15 - Resultados de ensaio ITSr.

Ensaio	MB1		MB2		MB3	
	ITSd	ITSw	ITSd	ITSw	ITSd	ITSw
	2331,6	1431,3	2174,0	1579,7	2396,5	1775,3
ITSr (%)	61,4		72,7		74,1	

Da análise do Quadro 4.15 verifica-se que os provetes de maior baridade, e consequente menor porosidade, apresentam um índice de tração indireta mais elevado. A mistura MB1 apresenta um índice de tração indireta notavelmente inferior, cerca de 10% inferior comparado às demais misturas. As misturas MB2 e MB3 apresentam índices de tração indireta

muito similares, apesar deste último ser ligeiramente superior, apresentando uma resistência à água idêntica. A análise dos três resultados revela que a mistura MB1 é a mais suscetível à água, talvez por a mistura MB1 ser apenas constituída por agregados graníticos ou pela sua compactação ter sido tenuemente mais ligeira que as outras.

Tomando em conta a repetibilidade anunciada na norma EN 12697-12, de 15%, pode afirmar-se que os resultados da sensibilidade à água das misturas não apresentam uma diferença superior e, portanto, não é considerada significativa.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência conservada são apresentados no Quadro 4.16 e graficamente na Figura 4.13, juntamente com os resultados da sensibilidade à água.

Quadro 4.16 - Resultados de ensaio IRC.

Ensaio	MB1		MB2		MB3	
	Provetes Secos	Provetes Molhados	Provetes Secos	Provetes Molhados	Provetes Secos	Provetes Molhados
Baridade média (kg/m <sup>3</sup> )	2342	2361	2357	2361	2350	2359
Estabilidade média (kN)	24,5	20,0	20,8	18,4	21,6	19,8
IRC (%)	81,6		88,6		91,4	

Da análise dos resultados obtidos no quadro anterior, verifica-se que a resistência conservada da mistura MB1 é inferior às restantes misturas, sendo que estas apresentam, mais uma vez, valores parecidos e, portanto, uma melhor resistência à água.

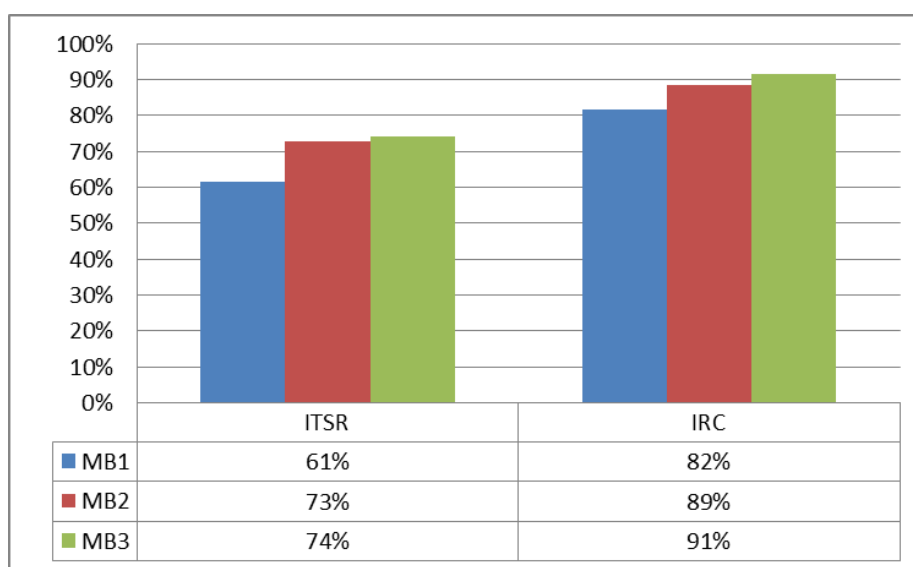


Figura 4.13 - Resultados de ITSR e IRC das misturas betuminosas.

É importante referir que, apesar de se representarem os resultados dos dois métodos de ensaio no mesmo gráfico, estes valores não são diretamente equiparáveis pois correspondem a diferentes modos de aplicação de carga e naturalmente estados de tensão no provete diferentes.

À primeira vista, os resultados de ambos os ensaios, ITSR e IRC, seguiram a mesma tendência, sendo o valor mais baixo o da mistura MB1 e o valor mais alto o da mistura MB3. Os resultados obtidos também revelaram que os valores de resistência conservada obtidos pela aplicação da norma Militar foram sempre superiores aos registados pela norma Europeia, na ordem dos 20%, sensivelmente.

Ambos os métodos têm algumas diferenças, nomeadamente no que diz respeito ao tempo e temperatura de condicionamento dos provetes que se reflete nos resultados dos ensaios.

Não sendo especificado um valor normativo para valores de ITSR, foi tomado como referência o valor de resistência conservada presente no CEEP para as misturas em estudo, 80%. Deste modo, constatou-se que as misturas em estudo apresentam valores díspares consoante o método utilizado, pelo que as misturas ensaiadas pela norma europeia não revelam boa resistência à água em contraste com as mesmas misturas ensaiadas pela norma militar americana que apresentam boa resistência à água. Apesar dos resultados obtidos pela norma Europeia e tratando-se de uma mistura para camadas de base, o CEEP não prevê a obrigatoriedade do uso de aditivos para melhorar a adesividade da mistura betuminosa, pelo que se optou por não adicionar aditivos.

#### **4.6.2 Resistência à Fadiga e Rigidez**

As características dos provetes prismáticos (Figura 4.14) usados nos ensaios de determinação do módulo de rigidez e resistência à fadiga são apresentados no Quadro 4.17, Quadro 4.18 e Quadro 4.19 consoante a mistura betuminosa.



Figura 4.14 - Provete prismáticos usados nos ensaios de determinação do módulo de rigidez e resistência à fadiga.

Quadro 4.17 - Características volumétricas dos provetes para o ensaio de resistência à fadiga e módulo de rigidez (MB1).

Mistura	Provete	Massa (kg)	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
<b>MB1</b>	1.1	3,356	2340	5,1
	1.2	3,342	2358	4,4
	1.3	3,345	2356	4,5
	1.4	3,371	2360	4,3
	1.5	3,353	2341	5,1
	1.6	3,356	2338	5,2
	1.7	3,377	2347	4,9
	1.9	3,404	2341	5,1
	1.10	3,376	2350	4,7
	1.11	3,389	2343	5,0
	1.12	3,375	2348	4,8
	<b>Média</b>	<b>3,368</b>	<b>2347</b>	<b>4,8</b>

Quadro 4.18 - Características volumétricas dos provetes para o ensaio de resistência à fadiga e módulo de rigidez (MB2).

Mistura	Provete	Massa (kg)	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
MB2	2.1	3,493	2384	3,6
	2.2	3,531	2395	3,2
	2.3	3,544	2399	3,0
	2.4	3,344	2394	3,2
	2.5	3,519	2382	3,7
	2.6	3,464	2365	4,4
	2.8	3,509	2394	3,2
	2.9	3,496	2391	3,4
	2.10	3,481	2366	4,4
	2.11	3,502	2386	3,6
	<b>Média</b>	<b>3,488</b>	<b>2386</b>	<b>3,6</b>

Quadro 4.19 - Características volumétricas dos provetes para o ensaio de resistência à fadiga e módulo de rigidez (MB3).

Mistura	Provete	Massa (kg)	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
MB3	3.1	3,520	2359	4,5
	3.2	3,567	2353	4,8
	3.3	3,540	2369	4,1
	3.4	3,440	2362	4,4
	3.5	3,361	2341	5,3
	3.6	3,492	2357	4,6
	3.7	3,470	2368	4,2
	3.8	3,452	2373	4,0
	3.9	3,370	2366	4,2
	3.10	3,436	2354	4,7
	3.11	3,407	2330	5,7
	3.12	3,425	2357	4,6
	<b>Média</b>	<b>3,457</b>	<b>2357</b>	<b>4,6</b>

Pela análise dos quadros anteriores, verifica-se que existe grande variação dos valores das características apresentadas. As massas variam entre 3,567kg e 3,342kg, as baridades variam entre 2399 kg/m<sup>3</sup> e 2330kg/m<sup>3</sup> e as porosidades variam entre 5,7% e 3,0%.

Observe-se ainda que, comparando os valores médios de cada mistura com os valores do Quadro 4.13 (valores obtidos a partir das misturas betuminosas após produção em central), também sofrem algumas disparidades, mais ou menos acentuadas, nestas duas características. Na mistura MB1 e MB3 os valores são relativamente próximos, enquanto na mistura MB2, estes são mais discrepantes, 2386 kg/m<sup>3</sup> e 3,6% para 2362 kg/m<sup>3</sup> e 4,5%. Esta diferença pode estar relacionada com a baridade-alvo para obtenção das placas ter sofrido uma alteração por material a mais, fazendo com que na compactação de mais material desse origem a uma maior baridade e como consequência uma menor porosidade.

#### → Módulo de Rigidez

Os resultados obtidos dos provetes de cada mistura betuminosa para as diversas frequências aplicadas são apresentados graficamente na Figura 4.15 e numericamente no Anexo F.

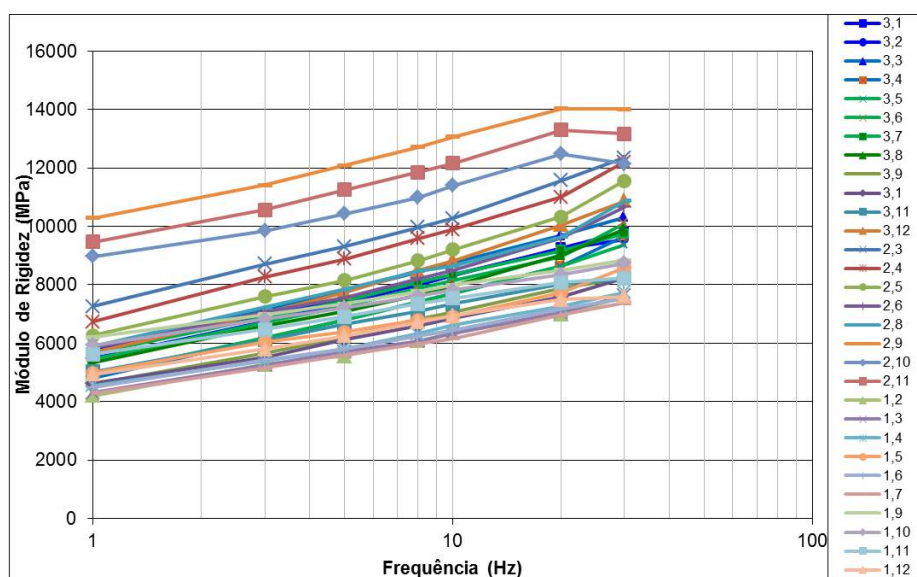


Figura 4.15 - Resultados obtidos para o módulo de rigidez de cada provete.

Da análise da Figura 4.15, destaca-se o módulo de rigidez elevado de 3 provetes. Estes provetes (2.9, 2.10 e 2.11) foram serrados de uma placa em que aquando do início da sua compactação houve uma falha de energia, pelo que se iniciou novamente o processo, ficando esta com uma compactação ligeiramente mais elevada que as restantes, como evidencia a sua rigidez.

A representação da média dos valores do módulo de rigidez de cada mistura, com exceção dos provetes atrás referidos, é apresentada na Figura 4.16.

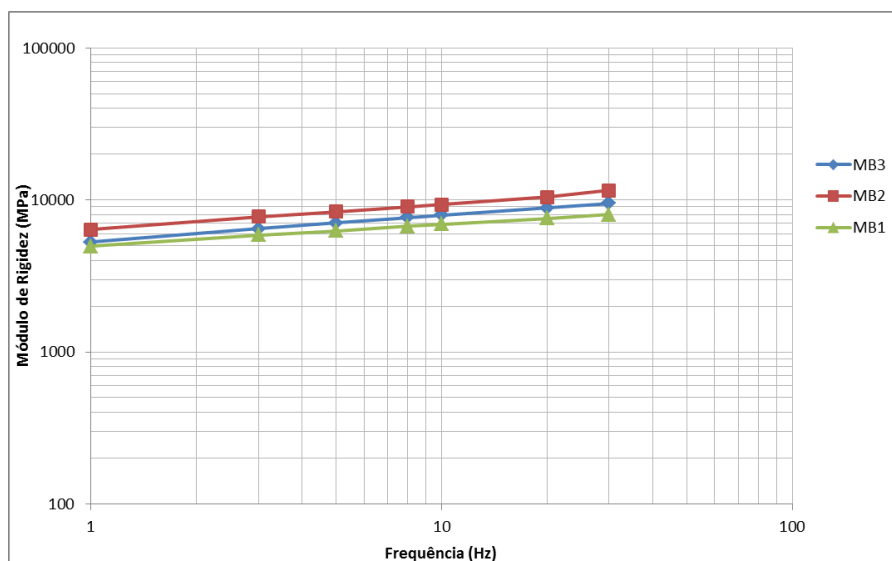


Figura 4.16 - Resultado da média do módulo de rigidez de cada mistura.

Da figura anterior, pode-se constatar que o módulo de rigidez de todas as misturas betuminosas aumenta com o aumento da frequência aplicada. Por outro lado, as misturas MB2 e MB3, ou seja, as misturas com incorporação de material fresado, apresentam um módulo de rigidez maior que a mistura tradicional sem fresados (MB1).

Ao serem comparadas as misturas MB2 e MB3, constatou-se que a mistura MB2 apresenta valores de rigidez ligeiramente mais elevados que a mistura MB3. Uma vez que a situação se repete para toda a gama de frequências, pode-se considerar que este facto se deve à maior compactação que as placas destas misturas tiveram por erro na baridade-alvo para enchimento do molde.

Para uma melhor percepção da grandeza deste parâmetro, foram escolhidos aleatoriamente 3 frequências de ensaio (5Hz, 10Hz e 20Hz) e apresentados no Quadro 4.20 a média dos módulos de rigidez e ângulo de fase de cada mistura betuminosa, juntamente com a média das respectivas baridades e porosidades.



Quadro 4.20 - Módulos de rigidez de cada mistura betuminosa medidos a 5Hz, 10Hz e 20Hz.

Mistura	Módulo de Rigidez (MPa)			Ângulo de Fase (°)			Baridade (kg/m³)	Porosidade (%)
	5Hz	10Hz	20Hz	5Hz	10Hz	20Hz		
<b>MB1</b>	6257	6910	7559	22,8	11,6	5,5	2347	4,8
<b>MB2</b>	8345	9301	10428	24,9	9,3	4,3	2386	3,6
<b>MB3</b>	7062	7944	8842	22,1	13,1	8,9	2357	4,6

Analisando o Quadro 4.20, verifica-se que a mistura MB2 apresenta, no geral, valores de ângulo de fase inferiores pelo que manifesta uma tendência de resistir melhor às deformações permanentes, como se comprovará mais adiante. Por outro lado, em todas as misturas é visível na Figura 4.17 o decréscimo do ângulo de fase com o aumento do módulo de rigidez, o que evidencia um bom ajuste global entre as duas grandezas.

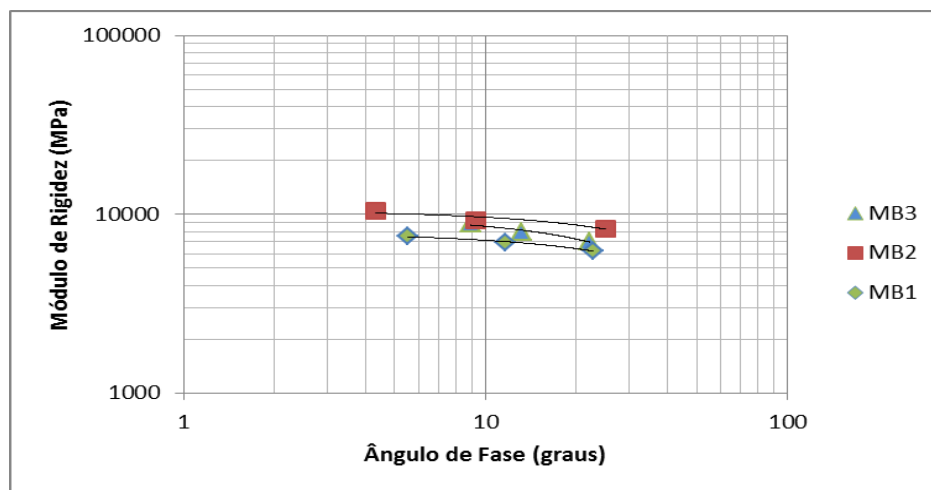


Figura 4.17 - Relação do ângulo de fase com o módulo de rigidez das misturas estudadas.

### → Resistência à Fadiga

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à fadiga apresentam-se na Figura 4.18 (numericamente no Anexo G) e estão expressos em função da extensão de tração aplicada e da correspondente vida à fadiga. Determinaram-se ainda as extensões de tração necessárias para que haja rotura do material ao fim de  $10^4$  ciclos,  $10^5$  ciclos e  $10^6$  ciclos, designada por  $\epsilon_4$ ,  $\epsilon_5$  e  $\epsilon_6$ , respectivamente. Os coeficientes das leis de fadiga e respectivos parâmetros são apresentados no Quadro 4.21.

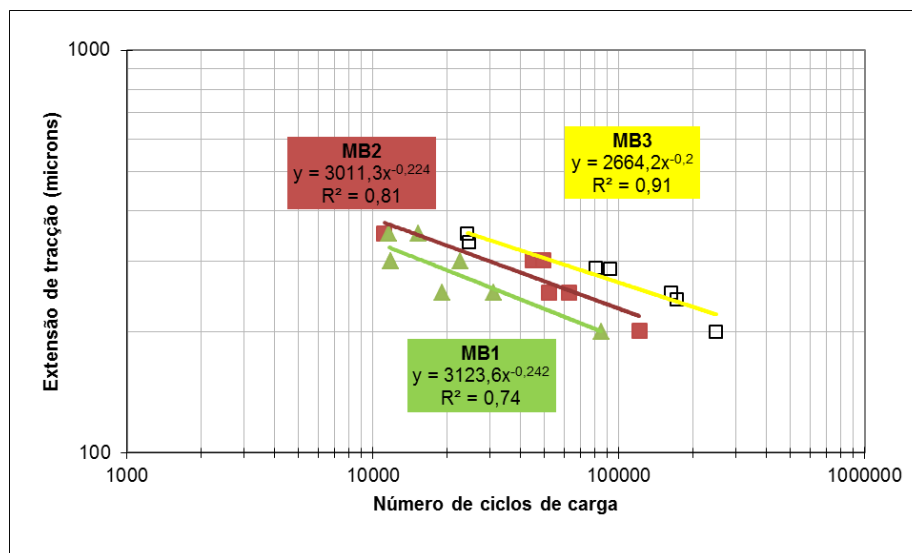


Figura 4.18 - Representação gráfica da lei de fadiga de cada mistura betuminosa.

Quadro 4.21 - Coeficientes das leis de fadiga das misturas e respectivos parâmetros  $\epsilon_4$ ,  $\epsilon_5$  e  $\epsilon_6$ .

Mistura	a	b	R <sup>2</sup>	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$
MB1	3123,6	-0,242	0,74	336,2	192,6	110,3
MB2	3011,3	-0,224	0,81	382,6	228,4	136,4
MB3	2664,2	-0,200	0,91	422,2	266,4	168,1

Após análise efetuada à Figura 4.18 constatou-se que todas as misturas betuminosas apresentam uma vida à fadiga com o desenvolvimento esperado, tal como mostra a Figura 3.16 (Baptista, 2006).

Também como (Baptista, 2006), as misturas recicladas apresentam um comportamento à fadiga idêntico ou mesmo melhor que a respectiva mistura tradicional. Os resultados obtidos permitem concluir que, para uma mesma extensão imposta, a mistura MB3 apresenta maior resistência à fadiga que a mistura MB2, que por sua vez apresenta maior resistência que a mistura MB1, pois os parâmetros  $\epsilon_4$ ,  $\epsilon_5$  e  $\epsilon_6$  em cada mistura são sucessivamente maiores.

Neste tipo de ensaios, extensão controlada, verifica-se usualmente uma diminuição da resistência à fadiga para módulos de rigidez mais elevados. Deste modo, os dados respeitantes às misturas MB2 e MB3 anteriormente analisados, estão coerentes uma vez que a mistura MB2 apresenta maiores módulos que a mistura MB3 e, por sua vez, menor resistência à fadiga. Em relação à mistura MB1, esta apresenta uma rigidez e uma vida à fadiga inferiores às demais misturas.

#### 4.6.3 Resistência à deformação permanente

Os ensaios com simulador de tráfego, também designado de *Wheel Tracking*, foram realizados sobre uma placa de cada mistura, apesar de a norma recomendar duas. Este facto, deveu-se à colheita das misturas MB1 e MB2 ser insuficiente para a moldagem de uma segunda placa, pelo que também se optou por ensaiar uma placa da mistura MB3.

O resultado do ensaio de wheel tracking é uma curva que relaciona o tempo de ensaio com a deformação do provete. Como o equipamento realiza aproximadamente 21 ciclos por minuto, correspondendo cada ciclo a duas passagens da roda, pode relacionar-se o tempo de ensaio com os ciclos de carregamento. A prEN 12697-22 prescreve que os resultados sejam analisados em função do tempo.

No Quadro 4.22 apresentam-se as características das placas (Figura 4.19) para efeito do ensaio de pista. Os resultados finais do ensaio estão indicados no Quadro 4.23 (sendo todos os valores apresentados no Anexo H), sendo o desenvolvimento da rodeira apresentado graficamente na Figura 4.20.



Figura 4.19 – Exemplo de uma placa usada no ensaio de pista.

Quadro 4.22 - Características volumétricas dos provetes sujeitos ao ensaio de pista.

Características	MB1	MB2	MB3
Baridade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2324	2395	2353
Porosidade (%)	5,8	3,6	4,8

Da análise do Quadro 4.22, observa-se que a mistura MB2 apresenta valores de baridade mais elevados que a mistura MB3, que por sua vez apresenta valores mais elevados que a mistura MB1. No caso da porosidade, a mistura MB2 apresenta valores inferiores à mistura MB3, que por sua vez apresenta valores inferiores à mistura MB1. Esta ocorrência pode estar relacionada com o referido anteriormente no subcapítulo 'Módulo de Rigidez', no que respeita ao erro da baridade-alvo para enchimento do molde. Há ainda a considerar a perda de material aquando da compactação das misturas, fazendo com que o mesmo nível de compactação em menor massa originasse uma porosidade mais baixa.

Quadro 4.23 - Resultados médios do ensaio de pista.

Resultados do ensaio de pista			
Identificação da laje	MB1	MB2	MB3
WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga)	0,060	0,012	0,056
RD <sub>AIR</sub> (mm)	1,48	0,76	2,05

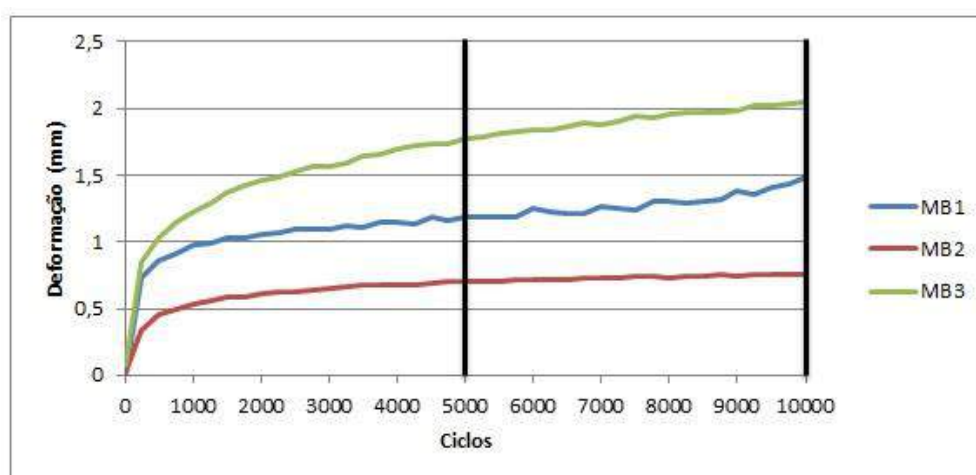


Figura 4.20 - Representação gráfica do desenvolvimento das rodeiras.

A análise anterior mostra que as curvas de deformação evidenciam duas fase distintas, como esperado de acordo com (Gardete, 2006). A primeira refere-se a uma deformação por carregamento mais acentuada e a segunda fase a uma deformação mais linear (Figura 3.18).

Comparando as Figura 3.18 e Figura 4.20, são evidentes as semelhanças das duas primeiras fases. A última fase não se verifica, pois corresponde à rotura do provete e as placas ensaiadas não a atingiram ao critério de paragem usado, 10000 ciclos de carga.

Observando o desenvolvimento da rodeira de cada mistura betuminosa na Figura 4.20, verifica-se que a mistura MB1 deforma-se menos a mistura MB3, mas mais que a mistura MB2. Estes resultados estão coerentes com os módulos de rigidez apresentados. As misturas com maiores módulos apresentam uma rodeira menos acentuada.

Dito isto, e como a mistura MB2 apresenta resultados muito baixos em comparação com as restantes, foi produzida e compactada em laboratório uma placa extra da mistura MB2, com a mesma fórmula de trabalho, e ensaiada. Esta placa extra tem 2380 kg/m<sup>3</sup> de baridade e 3,8% de porosidade. As características e resultados da placa extra são apresentados no Quadro 4.24 e o mesmo pode ser observado na Figura 4.21 (e numericamente no Anexo H), juntamente com as deformações das outras misturas.

Quadro 4.24 - Características e resultados de ensaio da placa extra (MB2).

Características	Placa extra MB2
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	2380
Porosidade (%)	3,8
WTsm <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga)	0,056
RDm <sub>AIR</sub> (mm)	1,93

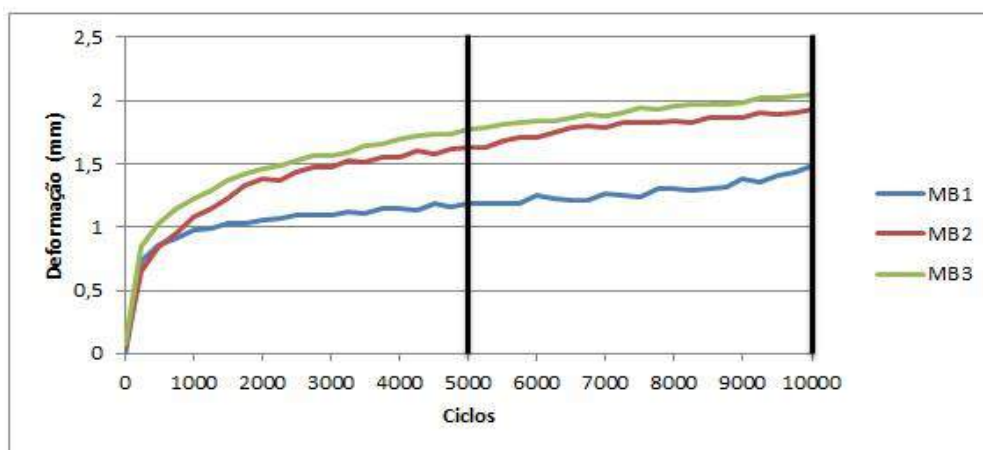


Figura 4.21 - Representação gráfica do desenvolvimento das rodeiras, considerando a placa extra da mistura MB2.

As curvas de deformação permanente evidenciam um comportamento à deformação permanente que melhora ligeiramente com o aumento da taxa de reciclagem. É também de

notar que, a mistura produzida com o betume mais brando 50/70 apresenta um desempenho idêntico ao da mistura produzida com o betume 35/50. Além do mais, verifica-se que a rodeira atingida nas misturas MB2 e MB3 é praticamente a mesma e levemente superior à rodeira da mistura MB1. Os resultados acabam por estar diretamente relacionados com as características de deformabilidade das misturas.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Conclusões**

No presente trabalho desenvolveu-se um estudo laboratorial para avaliar o comportamento de uma mistura do tipo AC20 base 35/50 (MB) sem e com incorporação de material fresado. As misturas foram produzidas em central contínua e compactadas em laboratório com o auxílio do compactador de rolo.

Tendo por base o principal objetivo desta dissertação, foi efetuado um estudo de formulação para cada mistura betuminosa pela norma NP EN 13108, baseado na avaliação do material fresado e no estudo Marshall, ensaios de sensibilidade à água, avaliação da sua rigidez, e ensaios de resistência à fadiga e às deformações permanentes. Toda a parte experimental deste trabalho foi efetuada nas instalações da empresa Tecnovia – Sociedade de Empreitadas S.A.

Uma formulação apropriada de misturas betuminosas, tradicionais ou recicladas, produzidas a quente em central, traduzida num adequado estabelecimento da fórmula de trabalho de execução dará uma melhor garantia de um bom comportamento da mistura em serviço. Este comportamento está, portanto, intrínseco às características mecânicas da mistura e, por sua vez, às características dos seus constituintes.

Deste modo, foram estabelecidas as percentagens ótimas de betume para cada mistura, a partir da caracterização dos seus constituintes. Adotou-se 4,3% de betume final para a mistura tradicional e 4,5% para as misturas recicladas, e foi verificada a conformidade de todos os valores obtidos no estudo Marshall e após produção em central com os limites definidos no CEEP.

A sensibilidade à água foi avaliada segundo a norma EN 12697-12 (ITSR) e a norma militar MIL-STD-620A (IRC). Do primeiro ensaio, resultaram valores de ITSR compreendidos entre 61% e 74%, sendo o menor valor respeitante à mistura MB1 e o maior à mistura MB3. Tomando como base o valor de 15% de repetibilidade presente na respectiva norma, pode-se comprovar que a variação dos resultados não é significativa. Do segundo ensaio, resultaram valores de IRC compreendidos entre 82% e 91%, sendo o menor valor referente à mistura MB1 e o maior valor à mistura MB3. Em ambos os ensaios, verifica-se a mesma tendência de aumento dos valores de ITSR e IRC com o aumento da taxa de reciclagem e que a diferença de resultados

entre os mesmos é de aproximadamente 20%. Sendo o valor de referência mínimo de 80% no CEEP, conclui-se que as misturas avaliadas pela norma europeia apresentam valores inferiores, em contraste com a norma militar, que apresenta valores de resistência à água satisfatórios.

O estudo das características de deformabilidade e do comportamento à fadiga consistiu em submeter os provetes prismáticos a ensaios de flexão apoiados em 4 pontos, em condições de deslocamento controlado. Em termos de carregamento, adotou-se um carregamento sinusoidal no tempo para as extensões escolhidas.

No ensaio de determinação do módulo de rigidez e ângulo de fase, usando uma temperatura de 20°C e um espectro de frequências de 1Hz a 30Hz, verifica-se um aumento do módulo de rigidez e diminuição do ângulo de fase com o aumento da frequência aplicada, significando que para carregamentos mais curtos no tempo, o material apresenta menor resistência para as deformações permanentes mas um melhor comportamento à fadiga. De salientar o facto de a mistura MB2 apresentar valores de rigidez mais elevadas devido ao erro da baridade-alvo ocorrida aquando a sua compactação, que se traduziu num maior enchimento dos moldes com material desta mistura em comparação com os restantes, sendo portanto mais compactados.

Quanto ao ensaio de fadiga, consideraram-se parâmetros usualmente considerados em projeto: uma temperatura de 20°C e uma frequência de 10Hz. Os resultados obtidos mostraram que as misturas com incorporação de fresados apresentam valores de  $\epsilon_4$ ,  $\epsilon_5$  e  $\epsilon_6$  maiores que a mistura tradicional, pelo que exibiram um melhor comportamento à fadiga.

No ensaio de pista, os resultados obtidos mostram valores muito idênticos; as rodeiras finais estão compreendidas entre 1,48 e 2,05mm, sendo que as misturas recicladas evidenciam um comportamento muito similar.

A técnica de reciclagem a quente em central, apesar de apresentar vantagens económicas e ambientais, tal como o não depósito da totalidade de resíduos em vazadouro, apresenta algumas desvantagens aliadas à produção, nomeadamente a taxa de incorporação de material fresado, maior ou menor consoante o tipo de central, e a temperatura de aquecimento dos materiais constituintes da mistura betuminosa. De qualquer forma, esta tecnologia pode ser considerada uma boa solução desde que a central escolhida seja capaz de produzir, sem limitações, as misturas betuminosas propostas e exista um controlo de qualidade antecipado dos materiais constituintes e do funcionamento correto da central.



Em suma, verificou-se que é possível prever em laboratório o comportamento de misturas produzidas a quente em central, em termos de formulação. As misturas compactadas em laboratório apresentam um desempenho que vem confirmar que as misturas recicladas a quente são confiáveis, pois apresentam um comportamento satisfatório quando comparado com o das misturas tradicionais.

Na seleção de uma técnica de reabilitação, seja ela tradicional ou com reciclagem, devem ser considerados os fatores de ordem técnica, ambiental e económica. Numa vertente mais ambiental e económica, verificou-se que recorrendo à reciclagem a quente em central, com taxas não muito elevadas (10% e 20%), e portanto, sem custos e adaptações às centrais de fabrico adicionais, a redução de custos é atrativa na ótica de quem executa. Neste âmbito, verificou-se que, comparando com a mistura tradicional, a mistura MB2 permite uma poupança de 0,2% de betume virgem e 9,6% de agregados novos, melhorando o seu comportamento de resistência à água em 9,5% e de resistência à fadiga em 19%. No caso da mistura MB3, este permite economizar 0,7% de betume virgem e 19,1% de agregados novos, aprimorando a sua resistência à água em 11% e a resistência à fadiga em 39%. Em ambas as misturas recicladas, verificou-se que a deformação permanente registou valores de 0,5mm superiores à mistura convencional.

Considera-se que a realização de ensaio de avaliação do desempenho permite, para o caso de misturas não tradicionais, impulsionar a sua introdução na prática construtiva. O presente trabalho visou dar uma contribuição neste sentido, embora se considere necessário prosseguir a investigação nesta área.

## **5.2 Desenvolvimentos Futuros**

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de misturas betuminosas recicladas produzidas a quente em central e de dar continuidade à temática aqui desenvolvida, sugere-se o desenvolvimento de alguns trabalhos de investigação futuros.

A avaliação do desempenho de misturas betuminosas com incorporação de material fresado, em estudos laboratoriais, deve permitir avaliar uma gama mais larga de materiais. A utilização de misturas com betumes com diferentes graus de envelhecimento, a incorporação de rejuvenescedores, o aumento da taxa de incorporação de ligantes, são factores cujo

conhecimento deverá ser mais aprofundado de modo a proporcionar uma mais larga utilização desta técnica de reciclagem.

Um outro tema que se considera importante é o de melhorar as técnicas construtivas associadas ao processo de incorporação de materiais fresados em misturas betuminosas. A existência de uma política nacional que incentive a reciclagem de misturas betuminosas permitirá certamente impulsionar este tipo de estudos.

À medida que vai sendo implementada, em algumas obras, a solução de reciclagem de misturas betuminosas, deverão realizar-se estudos que permitam avaliar o comportamento desses pavimentos, comparando os resultados obtidos com estudos laboratoriais de avaliação do desempenho, contribuindo para uma mais ajustada metodologia de previsão do comportamento dessas soluções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(Antunes, 2013) – Antunes, V. – *Influência do fíler no comportamento de mástiques betuminosos*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2013.

(Araujo, 2007) – Araujo, M. – *Efeito da radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Ouro Preto, Belo Horizonte, 2007.

(Aravind & Das, 2007) – Aravind, K.; Das, A. – *Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes*, Construction and Building Materials, vol. 21, págs. 928-936, 2007.

(Asphalt Institute, 1986) – The Asphalt Institute (AI) – *Asphalt hot-mix recycling*, MS-20, ed. 2, 1986.

(Baptista, 2006) – Baptista, A. – *Misturas betuminosas recicladas a quente em central: Contribuição para o seu estudo e aplicação*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

(Baptista et al, 2011) – Baptista, A.; Picado-Santos, L.; Capitão, S. – *Design of hot-mix recycled asphalt concrete produced in plant without preheating the reclaimed material*, International Journal of Pavement Engineering, vol. 14, n. 2, págs. 95-102, 2011.

(Bardini et al, 2010) – Bardini, V.; Klinsky, L.; Jr., J. – *A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas*, Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia, vol. 7, n. 1, págs. 71-78, 2010.

(Barrão, 2011) – Barrão, L. – *Avaliação do comportamento de misturas betuminosas sob temperaturas elevadas*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2011.

(Batista & Antunes, 2009) – Batista, F.; Antunes, M. – *Reciclagem de Pavimentos Utilizando Ligantes Betuminosos*, 2as Jornadas Cepsa Betumes /CRP, Lisboa, 2009.

(Batista, 2004) – Batista, F. – *Novas técnicas de reabilitação de pavimentos: Misturas betuminosas densas a frio*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.

(Bento, 2010) – Bento, F. – *Avaliação de desempenho de misturas betuminosas recicladas a quente*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

(Bernucci et al, 2007) – Bernucci, L.; Motta, L.; Ceratti, J.; Soares, J. – *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*, Cap. 2, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, Rio de Janeiro, 2007.

(Branco et al, 2011) – Branco, F.; Pereira, P.; Picado-Santos, L. – *Pavimentos rodoviários*, Edições Almedina, 4ª Reimpressão, Coimbra, 2011.

(Capitão et al, 2012) – Capitão, S.; Picado-Santos, L.; Martinho, F. – *Pavement engineering materials: review on the use of warm-mix asphalt*, Construction and Building Materials, vol. 36, págs. 1016-1024, 2012.

(Cepsa, 2007) – Cepsa Betumes – *Manual de pavimentação*, 2ª edição, 2007. Disponível em [www.cepsa.com](http://www.cepsa.com)

(CRR, 1987) – Centre de Recherches Routières - *Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés denses*, Recommandation R67/1987, Bruxelas, 1987.

(CRR, 1997) – Centre de Recherches Routières - *Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux*, Recommandation R69/97, Bruxelas, 1997.

(Cunha, 2010) – Cunha, C. – *Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: Diferentes tipos de reciclagem*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2009.

(Dias, 2009) – Dias, J. – *Influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2009.

(Dynapac, 2007) - Dynapac Compaction Equipment - *Compaction and paving: theory and practice*, 2007.

(EAPA, 1998) – European Asphalt Pavement Association (EAPA) – *Environmental guidelines on best available techniques (BAT) for the production of asphalt mixes*, Holanda, 1998.

(EAPA, 2012) European Asphalt Pavement Association – *Asphalt in figures*, 2012. Disponível em [www.eapa.org](http://www.eapa.org)

(Estradas de Portugal, 2009) – Estradas de Portugal – *Caderno de Encargos Tipo Obra, 15.03 Pavimentação – Métodos Construtivos*, Almada, 2012.

(Estradas de Portugal, 2012) – Estradas de Portugal – *Caderno de Encargos Tipo Obra, 14.03 Pavimentação - Características dos Materiais*, Almada, 2012.

(Fonseca, 2010) – Fonseca, P. – *Reciclagem de pavimentos rodoviários*, RECIPAV – Engenharia e Pavimentos, Sines, 2010.

(Fonseca et al, 2013) – Fonseca, P.; Guimarães, C.; Gomes, V.; Palha, D.; Silva, H.; Oliveira, J.; Abreu, L. – *Estudo de material fresado para incorporação em misturas betuminosas a quente com altas taxas de reciclagem*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2013.

(Freitas & Pereira, 2001) – Freitas, E.; Pereira, P. – *Estudo da evolução do desempenho dos pavimentos rodoviários flexíveis*, Engenharia Civil, págs. 47-58, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga, 2001.

(Gardete, 2006) – Gardete, D. – *Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

(Gomes et al, 2006) – Gomes, L.; Maricato, S.; Santos, J. – *Misturas betuminosas com reciclagem a quente*, V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, trabalho V-005, Recife, 2006.

(Hussain & Yanjun, 2013) – Hussein, A.; Yanjun, Q. – *Effect of reclaimed asphalt pavement on the propoerties os asphalt binders*, Procedia Engineering, vol. 54, págs. 840-850, 2013.

(Ibarra, 2003) – Ibarra, J - *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2003.

(Kandhal & Foo, 1997) – Kandhal, P.; Foo, K. – *Designing recycled hot mix asphalt mixtures using superpave technology*, NCAT Report no. 96-5, Auburn, 1997.

(Leite, 1999) – Leite, L. – *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero*, Tese de Doutorado, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

(Lima, 2003) – Lima, A. – *Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente*, Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

(Marini Ermont, 2014) – Marini-Ermont, Fayat Group. Disponível em [www.marini-ermont.fayat.com](http://www.marini-ermont.fayat.com). Acedido em Setembro de 2014.

(Matos, 2012) – Matos, P. – *Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados: Interação agregado-betume*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2012.

(Matos et al, 2014) – Matos, P.; Micaelo, R.; Duarte, C.; Quaresma, L. – *Influence of bitumen and filler on the selection of appropriate mixing and compaction temperatures*, International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 7, n. 4, págs. 237-246, 2014.

(Melo, 2008) – Melo, C. – *Gestão da qualidade da produção de betumes na Total Bitumen*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

(Moreira et al, 2006) – Moreira, J.; Gomes, A.; Pereira, P. – *Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento*, 4º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2006.

(Moreira & Pereira, 2007) – Moreira, J.; Pereira, P. – *Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento: Novas perspectivas*, VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Inovação e Novos Desafios, Porto, 2007.

(Motta & Leite, 2000) – Motta, L.; Leite, L. - *Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas*, Congresso Panamericano de Engenharia de Transito e Transporte, vol. 11, págs. 1007-1017, Gramado, 2000.

(Neves et al, 2012) – Neves, J.; Picado-Santos, L.; Alves, M.; Martinho, F.; Barbosa, F. – *Estudo experimental sobre o desempenho de misturas betuminosas temperadas*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2013.

- (Oliveira et al, 2007) – Oliveira, J.; Silva, H.; Pereira, P. – *Pavement recycling: An environmentally sustainable rehabilitation alternative*, The 5th International Symposium: Highway and Bridge Engineering, Romania, 2007.
- (Pais et al, 2001) – Pais, J.; Capitão, S.; Picado-Santos, L. – Estabelecimento de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição final, Jornadas de Estradas e Pontes dos Países de Língua Portuguesa, Lisboa, 2001.
- (Pais et al, 2004) – Pais, J.; Baptista, A.; Picado-Santos, L.; Trabulo, L. – *Misturas betuminosas recicladas a quente em central*, 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2004.
- (Pais & Palha, 2010) – Pais, J.; Palha, C. – *Resistência à fadiga em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários*, 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Guimarães, 2010.
- (Pellinen et al, 2008) - Pellinen, T.; Xiao, S.; Shah, A. - *The effect of aging on mechanical properties of hot-mix asphalt*, International Society for Asphalt Pavements Symposium, Zurich, 2008.
- (Picado-Santos et al, 2004) – Picado-Santos, L; Pais, J.; Martinho, F. – *Reciclagem de pavimentos rodoviários: Selecção do processo construtivo*, 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2004.
- (Pradyumna et al, 2013) – Pradyumna, T.; Mittal, A.; Jain, P. – *Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, vol. 104, págs. 1149-1157, 2013.
- (PRN, 2000) – Estradas de Portugal – *Plano Rodoviário Nacional*, Almada, 2000. Disponível em [www.estradasdeportugal.pt](http://www.estradasdeportugal.pt). Acedido em Setembro 2014.
- (Quaresma, 2002) – Quaresma, L. – *Fíler granítico em misturas betuminosas*, Relatório 62/02, LNEC, Lisboa, 2002.
- (Reis, 2013) – Reis, A. – *Propriedades macênicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida*, Instituto Militar de Engenharia, Exército Brasileiro; Ministério da Defesa, Rio de Janeiro, 2013.

(Sá da Costa & Diogo, 2012) – Sá da Costa, M.; Diogo, A. – *Reciclagem a quente em central de misturas betuminosas na perspectiva da regeneração do betume*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2013.

(Santana, 1995) – Santana, H. – *Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de fíler em misturas asfálticas*, Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Cuiabá, 1995.

(Santos, 2010) – Santos, J. – *Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2010.

(Silva, 2005) – Silva, H. – *Caracterização do mástique betuminoso e da ligação agregado-mastique: Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas*, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2005.

(Su et al, 2009) – Su, K.; Hachiya, Y.; Maekawa, R. – *Study on recycled asphalt concrete for use in surfasse course in airport pavement*, Resources, Conservation and Recycling, vol. 54, págs. 37-44, 2009.

(Tabakovic et al, 2010) – Tabakovic, A.; Gibney, A.; McNally, C.; Gilchrist, M. – *Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses*, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 22, n. 6, 2010.

(Teixeira, 2000) – Teixeira, A. – *Caracterização da resistência à fadiga d misturas betuminosas em equipamento servopneumático*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2000.

(Tonial, 2001) – Tonial, I. – *Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na ida de fadiga de pavimentos*, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

(Valdes et al, 2011) – Valdes, G.; Pérez-Jiménez, F.; Miró, R.; Martinez, A.; Botella, R. – *Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)*, Construction and Building Materials, vol. 25, págs. 1289-1297, 2011.

(Whiteoak, 1990) – Whiteoak, D. – *Shell betumen handbook*. Editora Shell, Inglaterra, 1990.

(Wirtgen, 2014) – Wirtgen Group. Disponível em [www.wirtgen-group.com](http://www.wirtgen-group.com). Acedido em Setembro 2014.



**REFERÊNCIAS NORMATIVAS**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) – ASTM D6373-99 - *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999, [www.astm.org](http://www.astm.org)

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 933-1 – *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise Granulométrica. Método de peneiração*. Tradução da EN 933-1, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 933-2 – *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica: Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas*. Tradução da EN 933-2, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 933-3 – *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento*. Tradução da EN 933-3, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 933-8 – *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Avaliação dos finos. Ensaio do equivalente de areia*. Tradução da EN 933-8, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 933-9 – *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 9: Avaliação dos finos. Ensaio do azul de metileno*. Tradução da EN 933-9, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 1097-1 – *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval)*. Tradução da EN 1097-1, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 1097-2 – *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação*. Tradução da EN 1097-2, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 1097-6 – *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*. Tradução da EN 1097-6, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 1426 – *Bitumen and bituminous binders: Determination of needle penetration*. Bruxelas, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 1427 – *Bitumen and bituminous binders: Determination of softening point – Ring and Ball method*. Bruxelas, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-1 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 1: Soluble binder content*. Bruxelas, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-3 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator*. Bruxelas, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-4 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 4: Bitumen recovery: Fractionating column*. Bruxelas, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-5 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density*. Bruxelas, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-6 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. Bruxelas, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-8 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Bruxelas, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-12 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous*. Bruxelas, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-14 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 14: Water content*. Bruxelas, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-22 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking*. Bruxelas, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-23 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Bruxelas, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-24 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 24: Resistance to fatigue*. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-26 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness*. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-30 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation by impact compactor*. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-33 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen preparation by roller compactor*. Bruxelas, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-34 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test*. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-35 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 35: Laboratory mixing*. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-39 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 39: Binder content by ignition*. Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-42 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 42: Amount of coarse foreign matter in reclaimed asphalt*. Bruxelas, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 13043 – *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*. Tradução da EN 13043, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 13108-1 – *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais, Parte 1: Betão Betuminoso*. Tradução da EN 13108-1, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 13108-8 – *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais, Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas*. Tradução da EN 13108-8, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 13108-20 – *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais, Parte 20: Ensaio de Tipo*. Tradução da EN 13108-20, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 13108-21 – *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais, Parte 21: Controlo da Produção em Fábrica*. Tradução da EN 13108-21, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica, 2011.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC) – E472 – *Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central*. Lisboa, 2006.

MILITARY STANDARD (MIL) – MIL-STD-620A – *Test methods for bituminous paving materials*. USA Government Publications - Department of Defense, 1966.

**ANEXOS**



→ **Anexo A: Historial do material fresado armazenado nas instalações da empresa em Viseu, referente aos anos 2008-2014.**

É objetivo deste anexo analisar a dispersão das características do material fresado, utilizado na produção de misturas betuminosas na central de Viseu da Tecnovia, tomando como base um conjunto de ensaios realizados entre os anos de 2008 e 2014, sendo:

A análise granulométrica do agregado recuperado seguiu as normas LNEC E233 e NP EN 933-1, a percentagem de betume solúvel pelo método da centrifugação com recuperação de finos seguiu as normas ASTM D-2172 e EN 12697-1 e as características do betume recuperado, penetração e temperatura de amolecimento seguiram as normas EN 1426 e EN 1427, respetivamente. A estas normas junta-se a NP EN 13108.

Nos anos de 2010 e 2011 não foi armazenado novo material fresado pelo que não são apresentados valores.

**Ano 2008:**

Quadro A.1 – Características do material fresado referente ao ano de 2008.

#ASTM (mm)	Fevereiro 2008		Julho 2008			
	Am. 6809	Am. 6811	Am. 7700	Am. 7701	Am. 7702	
<b>25</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>(% material passado)</b>
<b>19</b>	99,6	98,4	100,0	100,0	100,0	
<b>16</b>	99,1	97,5	100,0	100,0	99,8	
<b>12,5</b>	94,8	91,3	98,7	98,7	97,9	
<b>9,5</b>	86,7	80,6	87,8	91,4	91,4	
<b>4,75</b>	65,1	60,0	58,1	71,8	71,6	
<b>2</b>	47,1	43,1	40,8	53,1	52,8	
<b>0,85</b>	33,1	31,2	29,5	36,4	37,1	
<b>0,425</b>	24,2	23,2	51,6	25,9	26,2	
<b>0,18</b>	14,5	15,1	13,0	16,3	15,3	
<b>0,075</b>	10,7	10,2	9,6	12,2	11,5	
<b>% Betume</b>	4,6	4,3	4,3	4,5	4,6	<b>(% betume)</b>
<b>Penetração</b>	ND	ND	16	15	15	<b>(<math>\times 10^{-1}</math> mm)</b>
<b>Amolecimento</b>	ND	ND	64,3	63,5	65,0	<b>(°C)</b>

**Ano 2009:**

Quadro A.2 – Características do material fresado referente ao ano de 2009.

#ISO (mm)	Fev. 2009	Abr. 2009	Jun. 2009	Out. 2009	Dez. 2009	
	Am. 9107	Am. 9265	Am. 9414	Am. 7725	Am. 7956	
<b>20</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	ND	<b>(% material passado)</b>
<b>16</b>	ND	ND	ND	ND	100,0	
<b>14</b>	98,6	97,2	100,0	98,0	97,7	
<b>12,5</b>	ND	ND	ND	ND	96,7	
<b>10</b>	94,8	89,1	92,8	93,1	91,8	
<b>8</b>	ND	ND	ND	ND	84,2	
<b>6,3</b>	ND	ND	ND	ND	77,3	
<b>4</b>	74,8	67,8	56,0	64,6	65,7	
<b>2</b>	59,0	50,4	43,8	51,9	53,2	
<b>1</b>	44,7	35,3	34,0	40,1	41,4	
<b>0,5</b>	32,7	24,8	25,9	29,9	30,9	
<b>0,25</b>	ND	ND	ND	ND	22,9	
<b>0,125</b>	16,5	11,4	13,8	15,5	15,7	
<b>0,063</b>	11,0	7,2	9,5	10,5	10,9	
<b>% Betume</b>	4,6	4,8	4,4	4,6	4,7	<b>(% betume)</b>
<b>Penetração</b>	ND	ND	ND	ND	19,3	<b>(<math>\times 10^{-1}</math> mm)</b>
<b>Amolecimento</b>	ND	ND	ND	ND	68,9	<b>(°C)</b>

**Ano 2012:**

Quadro A.3 – Características do material fresado referente ao ano de 2012.

#ISO (mm)	Mar. 2012	Jun. 2012	Dez. 2012	
	Am. 5129	Am. 6309	Am. 6459	
<b>20</b>	ND	ND	ND	<b>(% material passado)</b>
<b>16</b>	ND	ND	ND	
<b>14</b>	99,2	99,2	99,6	
<b>12,5</b>	ND	ND	ND	
<b>10</b>	91,8	90,6	90,0	
<b>8</b>	ND	ND	ND	
<b>6,3</b>	ND	ND	ND	
<b>4</b>	62,3	66,9	62,8	
<b>2</b>	49,1	52,7	49,9	
<b>1</b>	ND	ND	ND	
<b>0,5</b>	28,6	29,8	29,7	
<b>0,25</b>	ND	ND	ND	
<b>0,125</b>	ND	ND	ND	
<b>0,063</b>	9,6	9,5	9,2	
<b>% Betume</b>	4,2	4,4	4,3	<b>(% betume)</b>
<b>Penetração</b>	17,3	14,0	14,3	<b>(<math>\times 10^{-1}</math> mm)</b>
<b>Amolecimento</b>	66,5	67,3	66,6	<b>(°C)</b>



**Ano 2013:**

Quadro A.4 – Características do material fresado referente ao ano de 2013.

#ISO (mm)	Fev. 2013	Set. 2013	Set. 2013	
	Am. 6459	Am. 6731	Am. 6747	
<b>20</b>	ND	ND	ND	<b>(% material passado)</b>
<b>16</b>	ND	100,0	100,0	
<b>14</b>	93,3	100,0	100,0	
<b>12,5</b>	ND	96,9	100,0	
<b>10</b>	93,3	89,0	93,4	
<b>8</b>	ND	89,0	83,5	
<b>6,3</b>	ND	89,0	73,3	
<b>4</b>	66,4	62,8	60,1	
<b>2</b>	53,5	49,3	47,1	
<b>1</b>	ND	49,3	36,0	
<b>0,5</b>	31,9	28,3	26,0	
<b>0,25</b>	ND	28,3	18,0	
<b>0,125</b>	ND	28,3	11,7	
<b>0,063</b>	10,5	10,0	7,5	
<b>% Betume</b>	4,4	3,2	3,6	<b>(% betume)</b>
<b>Penetração</b>	15,7	ND	ND	<b>(<math>\times 10^{-1}</math> mm)</b>
<b>Amolecimento</b>	66,1	ND	ND	<b>(°C)</b>

**Ano 2014:**

Quadro A.5 – Características do material fresado referente ao ano de 2014.

#ISO (mm)	Fev. 2014	Abr. 2014	Set. 2013	Out. 2014	Dez. 2014	
	Am. 6918	Am. 6747	Am. 6747	Am. 7194	Am. 7298	
<b>20</b>	ND	ND	ND	ND	ND	<b>(% material passado)</b>
<b>16</b>	100,0	100,0	100,0	ND	ND	
<b>14</b>	100,0	100,0	100,0	ND	ND	
<b>12,5</b>	96,4	96,9	100,0	96,0	95,0	
<b>10</b>	86,8	85,5	93,4	86,0	84,0	
<b>8</b>	86,8	85,5	83,5	ND	ND	
<b>6,3</b>	86,8	85,5	73,3	ND	ND	
<b>4</b>	56,2	63,0	60,1	56,0	51,0	
<b>2</b>	44,3	48,7	47,1	44,0	40,0	
<b>1</b>	44,3	48,7	36,0	ND	ND	
<b>0,5</b>	24,0	26,2	26,0	24,0	22,0	
<b>0,25</b>	24,0	26,2	18,0	ND	ND	
<b>0,125</b>	24,0	26,2	11,7	ND	ND	
<b>0,063</b>	7,6	7,7	7,5	7,8	7,1	
<b>% Betume</b>	3,9	3,5	3,6	3,0	3,2	<b>(% betume)</b>
<b>Penetração</b>	ND	ND	ND	ND	ND	<b>(<math>\times 10^{-1}</math> mm)</b>
<b>Amolecimento</b>	ND	ND	ND	ND	ND	<b>(°C)</b>



→ Anexo B: Declarações de desempenho dos agregados e betumes.

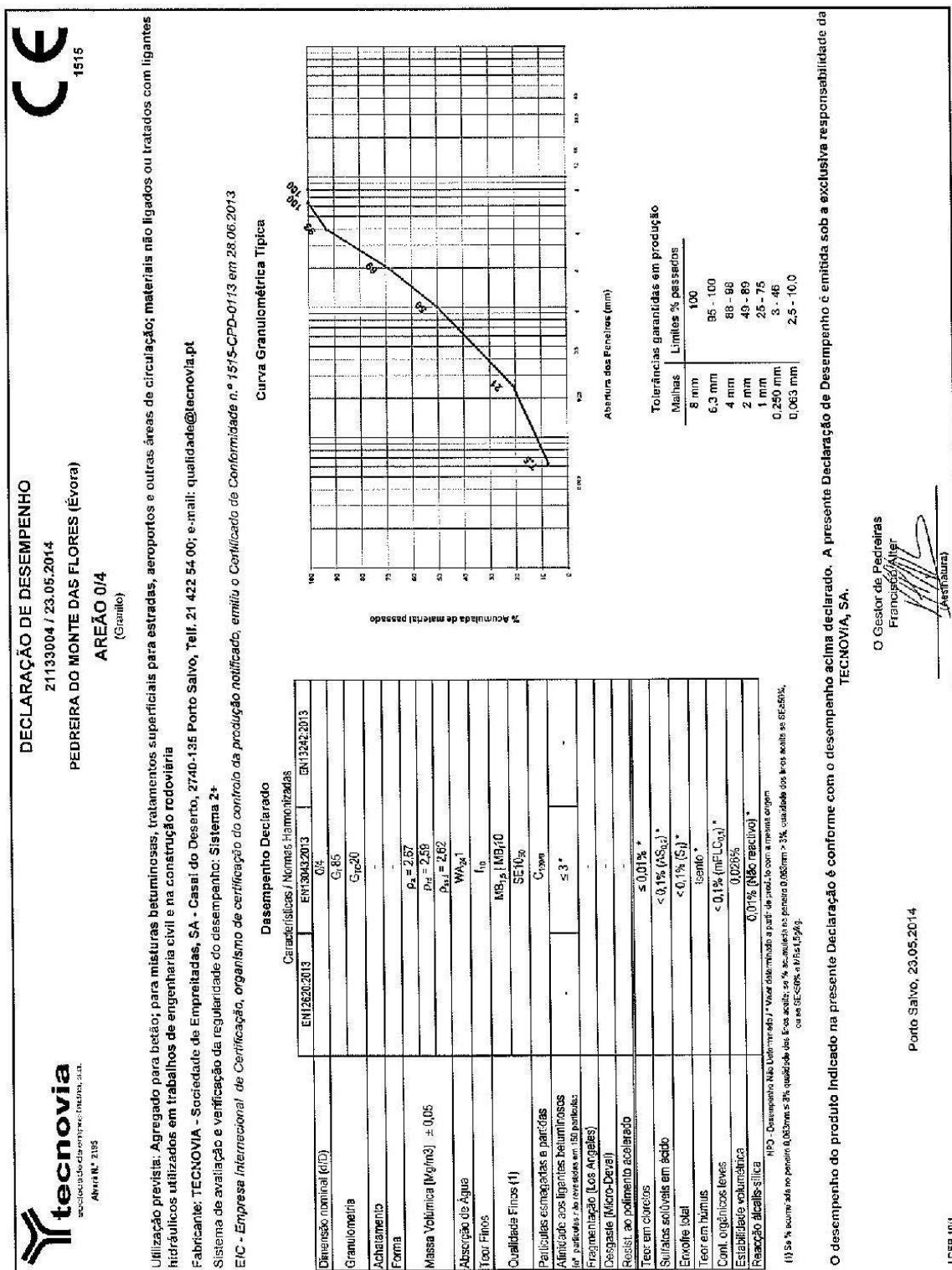



Figura B.1 – Declaração de desempenho do areão 0/4.



**tecnovia**  
Sociedade de Empreitadas, SA  
Alvará N.º 2195

**DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO**  
N.º 21133032 / 23.05.2014  
**PEDREIRA DO MONTE DAS FLORES**  
**BRITA 4/10**  
(Granito)

Utilização prevista: Agregado para materiais utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária

Fabricante: TECNOVIA - Sociedade de Empreitadas, SA - Casal do Deserto, 2740-135 Porto Salvo, Telf. 21 422 54 00; e-mail: qualidade@tecnovia.pt

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho: Sistema 2+

O controlo da produção em fábrica está coberto pelo certificado N.º 1515-CPD-0113.

**Desempenho Declarado**

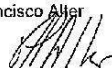
	Normas Harmonizadas
	EN13043:2013
Dimensão nominal (d/D)	4/10
Granulometria	G <sub>0,90</sub> /15   G <sub>25</sub> /15
Achalamento	F <sub>120</sub>
Forma	Sl <sub>20</sub>
Massa Volúmica [Mg/m³] ± 0,05	NPD
Absorção de Água	
Teor Finos	f <sub>1</sub>
Qualidade Finos (1)	-
Partículas esmagadas e partidas	C <sub>1000</sub>
Afinidade aos ligantes betuminosos (nº partículas não revestidas em 100 partículas ensaiadas)	≤ 3 *
Fragmentação (Los Angeles)	LA <sub>40</sub> *
Desgaste (Micro-Deval)	MDE <sub>16</sub> *
Resist. ao polimento acelerado	PSV <sub>50</sub> *
Teor em cloretos	≤ 0,01% *
Sulfatos solúveis em ácido	< 0,1% (AS <sub>0,2</sub> ) *
Enxofre total	< 0,1% (S <sub>1</sub> ) *
Teor em húmus	Isento *
Cont. orgânicos leves	< 0,1% (mPLC <sub>0,1</sub> ) *
Estabilidade volumétrica	0,026% *
Reacção álcalis-silica	0,01% (Não reactivo) *

NPD - Desempenho Não Determinado / \* Valor determinado a partir de produto com a mesma origem

O desempenho do produto indicado na presente Declaração é conforme com o desempenho acima declarado. A presente Declaração de Desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade da TECNOVIA, SA.

Porto Salvo, 23.05.2014

O Gestor de Pedreiras  
Francisco Alar



(Assinatura)

I.DEP.10/1

Figura B.2 – Declaração de desempenho da brita 4/10.





 <b>DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO</b> N.º 21133033 / 23.05.2014 <b>PEDREIRA DO MONTE DAS FLORES</b> <b>BRITA 10/14</b> (Granito)	
Utilização prevista: Agregado para materiais utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária Fabricante: <b>TECNOVIA - Sociedade de Empreitadas, SA</b> - Casal do Deserto, 2740-135 Porto Salvo, Telf. 21 422 54 00; e-mail: <a href="mailto:qualidade@tecnovia.pt">qualidade@tecnovia.pt</a> Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho: Sistema 2+ O controlo da produção em fábrica está coberto pelo certificado N.º 1515-CPD-0113.	
<b>Desempenho Declarado</b>	
	Normas Harmonizadas
	EN13043:2013
Dimensão nominal (d/D)	10/14
Granulometria	Gc90/15
Achatamento	Fl <sub>15</sub>
Forma	Sl <sub>20</sub>
Massa Volumica [Mg/m³] ± 0,05	NPD
Absorção de Água	
Teor Finos	f <sub>1,5</sub>
Qualidade Finos (1)	-
Partículas esmagadas e partidas	C <sub>1000</sub>
Afinidade aos ligantes betuminosos (nº partículas não revestidas em 150 partículas ensaiadas)	≤ 3 *
Fragmentação (Los Angeles)	LA <sub>40</sub> *
Desgaste (Micro-Deval)	MDE <sub>15</sub> *
Resist. ao polimento acelerado	PSV <sub>50</sub> *
Teor em cloretos	≤ 0,01% *
Sulfatos solúveis em ácido	< 0,1% (AS <sub>0,3</sub> ) *
Enxofre total	< 0,1% (S <sub>T</sub> ) *
Teor em húmus	Isento *
Cont. orgânicos leves	< 0,1% (mPLC <sub>0,1</sub> ) *
Estabilidade volumétrica	0,025% *
Reação álcalis-silica	0,01% (Não reactivo) *
NPD - Desempenho Não Determinado / * Valor determinado a partir de produto com a mesma origem.	
O desempenho do produto indicado na presente Declaração é conforme com o desempenho acima declarado. A presente Declaração de Desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade da TECNOVIA, SA.	
Porto Salvo, 23.05.2014  I.DEP.10/1	O Gestor de Pedreiras Francisco Alter  _____ (Assinatura)

Figura B.3 – Declaração de desempenho da brita 10/14.



**tecnovia**  
Sociedade de Empreitadas, S.A.  
Alvará N.º 2195

**DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO**  
N.º 21133003 / 23.05.2014  
**PEDREIRA DO MONTE DAS FLORES**  
**BRITA 12/20**  
(Granito)



**1515**

Utilização prevista: Agregado para betão; para misturas betuminosas, tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação; materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária

Fabricante: TECNOVIA - Sociedade de Empreitadas, SA - Casal do Deserto, 2740-135 Porto Salvo, Telf. 21 422 54 00; e-mail: qualidade@tecnovia.pt

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho: Sistema 2+

EIC - Empresa Internacional de Certificação, organismo de certificação do controlo da produção notificado, emitiu o Certificado de Conformidade n.º 1515-CPD-0113 em 28.08.2013

**Desempenho Declarado**

Normas Harmonizadas

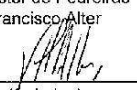
	EN12620:2013	EN13043:2013	EN13242:2013
Dimensão nominal (d/D)	12/20		
Granulometria	G <sub>c</sub> 85/20		G <sub>c</sub> 80/20
Achatamento	F <sub>l15</sub>		F <sub>l20</sub>
Forma	S <sub>l15</sub>		S <sub>l20</sub>
Massa Volumica [Mg/m³] ± 0,05	p <sub>a</sub> = 2,67 p <sub>rd</sub> = 2,63 p <sub>ssd</sub> = 2,64		
Absorção de Água	W <sub>A24</sub> 1		
Teor Finos	f <sub>1,5</sub>	f <sub>2</sub>	
Qualidade Finos	-		
Partículas esmagadas e partidas	C <sub>1000</sub>		
Afinidade aos ligantes betuminosos (nº partículas não revestidas em 150 partículas)	-	≤ 3 *	-
Fragmentação (Los Angeles)	LA <sub>40</sub> *		
Desgaste (Micro-Deval)	MDE <sub>15</sub> *		
Resist. ao polimento acelerado	-		
Teor em cloretos	≤ 0,01% *		
Sulfatos solúveis em ácido	< 0,1% (AS <sub>0,2</sub> ) *		
Enxofre total	< 0,1% (S <sub>1</sub> ) *		
Teor em húmus	Isento *		
Cont. orgânicos leves	< 0,1% (mPLC <sub>0,1</sub> ) *		
Estabilidade volumétrica	0,026% *		
Reacção álcalis-silica	0,01% (Não reactivo) *		

NPD - Desempenho Não Determinado / \* Valor determinado a partir de produto com a mesma origem

O desempenho do produto indicado na presente Declaração é conforme com o desempenho acima declarado. A presente Declaração de Desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade da TECNOVIA, SA.

Porto Salvo, 23.05.2014

O Gestor de Pedreiras  
Francisco Alter



(Assinatura)

I DEP.10/1

Figura B.4 – Declaração de desempenho da brita 12/20.



---

## Declaração de Desempenho N.º DD-PT-B35/50

---

### 1. CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO ÚNICO DO PRODUTO-TIPO

- BETUME 35/50.

### 2. TIPO, LOTE OU NÚMERO DA SÉRIE, OU QUAISQUER OUTROS ELEMENTOS QUE PERMITAM A IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO DE CONSTRUÇÃO, NOS TERMOS DO N.º 4 DO ART.º 11

- O número do lote está indicado na etiqueta da embalagem do produto.

### 3. UTILIZAÇÃO OU UTILIZAÇÕES PREVISTAS DO PRODUTO DE CONSTRUÇÃO, DE ACORDO COM A ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA HARMONIZADA APLICÁVEL, TAL COMO PREVISTO PELO FABRICANTE

- Construção e manutenção de estradas, pistas de aeroporto e outras áreas pavimentadas.

### 4. NOME, DESIGNAÇÃO COMERCIAL OU MARCA COMERCIAL REGISTADA E ENDEREÇO DE CONTACTO DO FABRICANTE, NOS TERMOS DO N.º 5 DO ARTIGO 11.º

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| • CEPSA PORTUGUESA PETRÓLEOS, S.A. | TELEFONE: 217 217 829                   |
| Rua General Firmino Miguel n.º3    | FAX: 217 217 870                        |
| Torre 2 – 2º                       | EMAIL: apoiocliente.qualidade@cepsa.com |
| 1600-100 Lisboa                    |   |

### 5. NOME E ENDEREÇO DE CONTACTO DO MANDATÁRIO CUJO MANDATO ABRANGE OS ATOS ESPECIFICADOS NO N.º 2 DO ARTIGO 12.º

- Não aplicável.

### 6. SISTEMA OU SISTEMAS DE AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DO DESEMPENHO DO PRODUTO DE CONSTRUÇÃO

- 2+

### 7. DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO DO PRODUTO

- A CERTIF – Associação para a Certificação, organismo notificado n.º 1328, realizou a inspeção inicial da unidade fabril e no controlo da produção em fábrica e o acompanhamento, apreciação e avaliação contínuos do controlo da produção em fábrica no âmbito do sistema 2+ e emitiu o certificado de conformidade do controlo de produção em fábrica:
  - N.º 1328-CPR-0166
  - N.º 1328-CPR-0168

Figura B.5 – Declaração de desempenho do betume 35/50.



## Declaração de Desempenho N.º DD-PT-B35/50

### 8. DESEMPENHO DECLARADO

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS	DESEMPENHO	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS HARMONIZADAS
Penetração a 25 °C	35 - 50x0,1 mm	EN 12591:2009
Temperatura de amolecimento	50 - 58 °C	
Resistência ao envelhecimento a 163 °C (EN 12607-1)		
Penetração retida a 25 °C	≥ 53%	
Variação da temperatura de amolecimento	≤ 11 °C	
Índice de penetração	-1,5 a +0,7	
Viscosidade dinâmica a 60 °C	NPD	
Ponto de fragilidade Fraass	≤ -5 °C	

### 9. O DESEMPENHO DO PRODUTO IDENTIFICADO NOS PONTOS 1 E 2 É CONFORME COM O DESEMPENHO DECLARADO NO PONTO 7.

A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

O presente documento é assinado em nome da CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A., por:

Ricardo VICENTE

Responsável Qualidade-Defensor do Cliente

Lisboa, 02 de janeiro de 2014

Figura B.6 – Declaração de desempenho do betume 35/50 (continuação).





## Declaração de Desempenho N.º DD-PT-B50/70

### 1. CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO ÚNICO DO PRODUTO-TIPO

- BETUME 50/70

### 2. UTILIZAÇÃO(ões) PREVISTA(S)

- Construção e manutenção de estradas, pistas de aeroporto e outras áreas pavimentadas

### 3. FABRICANTE

- CEPSA PORTUGUESA PETRÓLEOS, S.A.  
Rua General Firmino Miguel n.º3  
Torre 2 - 2º  
1600-100 Lisboa
- TELEFONE: 217 217 829  
FAX: 217 217 870  
EMAIL: apoiocliente.qualidade@cepsa.com

### 4. MANDATÁRIO

- Não aplicável

### 5. SISTEMA(S) DE AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DO DESEMPENHO (AVCP)

- 2º

### 6A. NORMA HARMONIZADA

- EN 12591:2009

### ORGANISMO(S) NOTIFICADO(S)

- N.º 1328-CPR-0166

### 7. DESEMPENHO(S) DECLARADO(S)

REQUISITO ESSENCIAL	NORMA DE ENSAIO	UNIDADE	VALOR
Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	50-70
Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	46-54
Resistência ao endurecimento a 163 °C (EN 12607-1)			
Penetração retida	EN 1426	%	≥ 50
Aumento da temperatura de amolecimento - Severidade 2	EN 1427	°C	≤ 11
Variação em massa (valor absoluto)	EN 12607-1	%	≤ 0,5
Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 230
Solubilidade	EN 12592	%	≥ 99,0
Índice de penetração	EN 12591 Anexo A	-	-1,5 a +0,7
Temperatura de fragilidade Fraass	EN 12593	°C	≤ -8
Viscosidade cinemática a 135 °C	EN 12595	mm²/s	≥ 295

### 8. DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA ADEQUADA E/OU DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA ESPECÍFICA

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados. A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (EU) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do fabricante por:

Ricardo VICENTE

Em Lisboa em 11 de junho de 2014

Figura B.7 – Declaração de desempenho do betume 50/70.



→ **Anexo C: Granulometria dos agregados constituintes das misturas betuminosas e do material fresado.**

Quadro C.1 – Granulometria determinada para cada um dos agregados britados novos componentes das misturas betuminosas.

Peneiros ISO Série base+2 (em mm)	Areão 0/4	Brita 4/10	Brita 10/14	Brita 12/20
	<i>(0,1% material passado) (em g)</i>			
<b>31,5</b>	100	100	100	100
<b>20</b>	100	100	100	88
<b>16</b>	100	100	100	44
<b>14</b>	100	100	94	25
<b>12,5</b>	100	100	55	17
<b>10</b>	100	91	9	12
<b>8</b>	100	58	2	7
<b>6,3</b>	100	33	1	3
<b>4</b>	96	4	0	1
<b>2</b>	70	1	0	1
<b>1</b>	54	1	0	1
<b>0,5</b>	40	1	0	1
<b>0,25</b>	25	0	0	1
<b>0,125</b>	14	0	0	1
<b>0,063</b>	8,5	0,4	0,3	0,8

Quadro C.2 – Resultados da granulometria sobre o lote de material fresado.

Peneiros ISO: Série base+2 (em mm)	Material fresado (%)
31,5	100
20	100
16	98,1
14	94,7
12,5	92,1
10	86,1
8	79,5
6,3	70,2
5,6	6,8
4	54,9
2	41,4
1	30,8
0,5	23,6
0,25	17,2
0,125	12,4
0,063	9,4



→ **Anexo D: Cálculo das curvas granulométricas finais das misturas betuminosas.**

Quadro D.1 – Cálculo da curva granulométrica de mistura de agregados (MB1).

Peneiros ISO: Série base + 2 (mm)	Areão 0/4		Brita 4/10		Brita 10/14		Brita 12/20		Mistura	Fuso EP
	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	%pass.	%pass.
		<b>47</b>		<b>15</b>		<b>24</b>		<b>14</b>	<b>100</b>	-
<b>31,5</b>	100	47	100	15	100	24	100	14	100	100
<b>20</b>	100	47	100	15	100	24	88	12,3	98,3	90 – 100
<b>12,5</b>	100	47	100	15	55	13,2	17	2,4	77,6	57 – 86
<b>4</b>	96	45,1	4	0,6	0	0	1	0,1	45,9	34 – 49
<b>2</b>	70	32,9	1	0,2	0	0	1	0,1	33,2	26 – 41
<b>0,5</b>	40	18,8	1	0,2	0	0	1	0,1	19,1	12 – 26
<b>0,125</b>	14	6,6	0	0	0	0	1	0,1	6,7	4 – 4
<b>0,063</b>	8,5	4,0	0,4	0,3	0,3	0,1	0,8	0,1	4,2	2 – 7

Quadro D.2 – Cálculo da curva granulométrica de mistura de agregados (MB2).

Peneiros ISO: Série base + 2 (mm)	Areão 0/4		Brita 4/10		Brita 10/14		Brita 12/20		Fresados		Mistura	Fuso EP
	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	%pass.	%pass.
		<b>43</b>		<b>19</b>		<b>18</b>		<b>10</b>		<b>10</b>	<b>100</b>	-
<b>31,5</b>	100	43	100	19	100	18	100	10	100	10	100	100
<b>20</b>	100	43	100	19	100	18	88	8,8	100	10	98,8	90 – 100
<b>12,5</b>	100	43	100	19	55	9,9	17	1,7	92,1	9,2	82,8	57 – 86
<b>4</b>	96	41,3	4	0,8	0	0	1	0,1	54,9	5,5	47,6	34 – 49
<b>2</b>	70	30,1	1	0,2	0	0	1	0,1	41,4	4,1	34,5	26 – 41
<b>0,5</b>	40	17,2	1	0,2	0	0	1	0,1	23,6	2,4	19,9	12 – 26
<b>0,125</b>	14	6,0	0	0,2	0	0	1	0,1	12,4	1,2	7,6	4 – 4
<b>0,063</b>	8,5	3,7	0,4	0,1	0,3	0,1	0,8	0,1	9,4	0,9	4,8	2 – 7

Quadro D.3 – Cálculo da curva granulométrica de mistura de agregados (MB3).

Peneiros ISO: Série base + 2 (mm)	Areão 0/4		Brita 4/10		Brita 10/14		Brita 12/20		Fresados		Mistura	Fuso EP
	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	Mat.	Na mist.	%pass.	%pass.
		<b>37</b>		<b>16</b>		<b>16</b>		<b>11</b>		<b>20</b>	<b>100</b>	-
<b>31,5</b>	100	37	100	16	100	16	100	11	100	20	100	100
<b>20</b>	100	37	100	16	100	16	88	9,7	100	20	98,7	90 – 100
<b>12,5</b>	100	37	100	16	55	8,8	17	1,9	92,1	18,4	82,1	57 – 86
<b>4</b>	96	35,5	4	0,6	0	0	1	0,1	54,9	11,0	47,3	34 – 49
<b>2</b>	70	25,9	1	0,2	0	0	1	0,1	41,4	8,3	34,5	26 – 41
<b>0,5</b>	40	14,8	1	0,2	0	0	1	0,1	23,6	4,7	19,8	12 – 26
<b>0,125</b>	14	5,2	0	0,2	0	0	1	0,1	12,4	2,5	7,9	4 – 4
<b>0,063</b>	8,5	3,1	0,4	0,1	0,3	0,1	0,8	0,1	9,4	1,9	5,2	2 – 7



→ **Anexo E: Resultados dos estudos Marshall das misturas betuminosas.****Percentagens dos materiais constituintes**Quadro E.1 – Percentagens de agregados e betume para estudo Marshall (**MB1**).

Materiais	VO -1,0%		VO -0,5%		VO Expectável		VO +0,5%		VO +1,0%	
	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)
Betume 35/50	<b>3,5</b>	0,042	<b>4,0</b>	0,048	<b>4,5</b>	0,054	<b>5,0</b>	0,060	<b>5,5</b>	0,066
Areão 0/4	45,4	0,544	45,1	0,541	44,9	0,539	44,7	0,536	44,4	0,533
Brita 4/10	14,5	0,174	14,4	0,173	14,3	0,172	14,3	0,171	14,2	0,170
Brita 10/14	23,2	0,278	23,0	0,276	22,9	0,275	22,8	0,274	22,7	0,272
Brita 12/20	13,5	0,162	13,4	0,161	13,4	0,160	13,3	0,160	13,2	0,159
TOTAL	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200

Quadro E.2 – Percentagens de agregados, material fresado e betume para estudo Marshall (**MB2**).

Materiais	VO -1,0%		VO -0,5%		VO Expectável		VO +0,5%		VO +1,0%	
	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)
Betume 35/50	<b>3,1</b>	0,037	<b>3,6</b>	0,043	<b>4,1</b>	0,049	<b>4,6</b>	0,055	<b>5,1</b>	0,061
Cont. Fresado	<b>(0,4)</b>	-	<b>(0,4)</b>	-	<b>(0,4)</b>	-	<b>(0,4)</b>	-	<b>(0,4)</b>	-
Areão 0/4	41,5	0,498	41,3	0,496	41,1	0,493	40,8	0,490	40,6	0,487
Brita 4/10	18,4	0,220	18,2	0,219	18,1	0,218	18,0	0,216	17,9	0,215
Brita 10/14	17,4	0,209	17,3	0,207	17,2	0,206	17,1	0,205	17,0	0,204
Brita 12/20	9,7	0,116	9,6	0,115	9,5	0,115	9,5	0,114	9,4	0,113
Fresados	10,0	0,120	10,0	0,120	10,0	0,120	10,0	0,120	10,0	0,120
TOTAL	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200

Quadro E.3 – Percentagens de agregados, material fresado e betume para estudo Marshall (**MB3**).

Materiais	VO -1,0%		VO -0,5%		VO Expectável		VO +0,5%		VO +1,0%	
	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)	Em %	Em massa (kg)
Betume 50/70	<b>2,6</b>	0,031	<b>3,1</b>	0,037	<b>3,6</b>	0,043	<b>4,1</b>	0,049	<b>4,6</b>	0,055
Cont. Fresado	<b>(0,9)</b>	-	<b>(0,9)</b>	-	<b>(0,9)</b>	-	<b>(0,9)</b>	-	<b>(0,9)</b>	-
Areão 0/4	35,8	0,429	35,6	0,427	35,3	0,424	35,1	0,421	34,9	0,418
Brita 4/10	15,5	0,186	15,4	0,185	15,3	0,183	15,2	0,182	15,1	0,181
Brita 10/14	15,5	0,186	15,4	0,185	15,3	0,183	15,2	0,182	15,1	0,181
Brita 12/20	10,6	0,128	10,6	0,127	10,5	0,126	10,4	0,125	10,4	0,124
Fresados	20,0	0,240	20,0	0,240	20,0	0,240	20,0	0,240	20,0	0,240
TOTAL	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200	100,0	1,200

## Baridade Aparente

Quadro E.4 – Resultados experimentais da baridade aparente dos provetes (Estudo Marshall).

% Betume	Provete	Baridade Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]					
		MB1		MB2		MB3	
3,5%	1	2301	2306	2298	2306	2319	2314
	2	2309		2306		2315	
	3	2308		2312		2312	
	4	2306		2310		2311	
4,0%	5	2333	2334	2340	2342	2359	2370
	6	2335		2355		2359	
	7	2335		2333		2373	
	8	2334		2341		2388	
4,5%	9	2343	2339	2352	2354	2370	2377
	10	2346		2365		2387	
	11	2328		2355		2377	
	12	2339		2345		2375	
5,0%	13	2326	2323	2348	2350	2362	2368
	14	2319		2354		2365	
	15	2325		2355		2372	
	16	2322		2341		2372	
5,5%	17	2306	2304	2345	2338	2353	2355
	18	2308		2332		2354	
	19	2300		2339		2353	
	20	2301		2336		2358	



### Baridade Máxima Teórica

Quadro E.5 – Resultados experimentais da baridade máxima teórica (Estudo Marshall).

% Betume	Baridade Máxima Teórica [kg/m <sup>3</sup> ]		
	MB1	MB2	MB3
3,5%	2490	2535	2529
4,0%	2481	2511	2507
4,5%	2471	2488	2484
5,0%	2450	2467	2468
5,5%	2430	2455	2449

### Características de Vazios

Quadro E.6 – Resultados experimentais da porosidade (Estudo Marshall).

% Betume	Porosidade [%]		
	MB1	MB2	MB3
3,5%	7,4	9,0	8,5
4,0%	5,9	6,7	5,5
4,5%	5,4	5,4	4,4
5,0%	5,2	4,8	3,9
5,5%	5,2	4,8	3,8

Quadro E.7 – Resultados experimentais do VMA (Estudo Marshall).

% Betume	VMA [%]		
	MB1	MB2	MB3
3,5%	15,1	16,8	16,3
4,0%	14,8	15,7	14,6
4,5%	15,4	15,6	14,6
5,0%	16,2	16,0	15,3
5,5%	17,3	17,1	16,3

### Estabilidade e Deformação Marshall

Quadro E.8 – Resultados experimentais da estabilidade Marshall (Estudo Marshall).

% Betume	Provete	Estabilidade [kN]					
		MB1		MB2		MB3	
3,5%	1	11,3	12,9	14,3	14,9	14,2	14,7
	2	13,1		15,1		14,4	
	3	14,4		15,8		15,1	
	4	13,3		14,4		15,0	
4,0%	5	13,6	13,8	16,1	15,7	15,9	16,2
	6	13,2		14,4		16,3	
	7	14,7		16,2		15,8	
	8	13,6		15,9		16,5	
4,5%	9	15,6	13,9	17,8	16,3	18,0	16,9
	10	12,6		15,5		16,9	
	11	13,5		16,0		16,7	
	12	15,6		15,9		16,2	
5,0%	13	12,0	13,4	14,8	15,4	17,9	16,5
	14	14,2		16,4		16,7	
	15	14,1		15,8		15,6	
	16	12,1		14,8		15,9	
5,5%	17	11,8	12,4	14,5	15,0	16,7	16,1
	18	11,4		15,4		15,7	
	19	13,9		15,6		16,3	
	20	12,7		14,6		15,7	

Quadro E.9 – Resultados experimentais da deformação Marshall (Estudo Marshall).

% Betume	Provete	Deformação [mm]					
		MB1		MB2		MB3	
3,5%	1	2,4	2,2	3,0	2,9	2,0	2,2
	2	2,2		2,8		2,4	
	3	2,0		2,9		2,3	
	4	2,2		2,7		2,2	
4,0%	5	2,0	2,3	3,0	3,1	3,0	3,1
	6	2,5		3,3		3,1	
	7	2,4		2,8		3,2	
	8	2,2		3,4		3,1	
4,5%	9	2,5	2,4	3,2	3,4	3,4	3,6
	10	2,2		3,5		3,7	
	11	2,3		3,1		3,3	
	12	2,5		3,6		3,8	
5,0%	13	2,6	2,6	3,3	3,5	3,9	4,0
	14	2,6		4,2		4,1	
	15	2,5		3,8		4,0	
	16	2,7		2,7		3,9	
5,5%	17	3,7	3,2	3,2	4,1	4,0	4,2
	18	2,8		4,2		4,9	
	19	3,1		4,7		4,0	
	20	3,1		4,2		4,1	



→ **Anexo F: Resultados dos módulos de rigidez.**

No quadro seguinte são apresentados os valores médios do módulo de rigidez das misturas betuminosas estudadas para a gama de frequências usada.

Quadro F.1 – Resultados dos ensaios de determinação dos módulos de rigidez das misturas betuminosas estudadas.

Mistura	Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez (MPa)	
<b>MB1</b>	1	4951	-
	3	5858	
	5	6257	
	8	6689	
	10	6910	
	20	7559	
	30	7982	
<b>MB2</b>	1	7585	6393(*)
	3	8834	7770(*)
	5	9435	8345(*)
	8	10072	9007(*)
	10	10390	9301(*)
	20	11492	10428(*)
	30	12117	11526(*)
<b>MB3</b>	1	5267	-
	3	6466	
	5	7062	
	8	7659	
	10	7944	
	20	8842	
	30	9502	

(\*)Módulos de rigidez da mistura MB2 com excepção dos provetes 2.9, 2.10 e 2.11.



→ **Anexo G: Resultados do ensaio de resistência à fadiga.**

Quadro G.1 – Resultados dos ensaios de resistência à fadiga das misturas betuminosas estudadas.

Mistura	Extensão (E-6)	Provete	Vida à fadiga (ciclos)
<b>MB1</b>	350	1.2	11628
		1.3	15383
	300	1.4	22632
		1.5	11808
		1.6	11815
	250	1.7	31163
		1.9	19221
	200	1.10(*)	45575
		1.11(*)	40029
		1.12	84788
<b>MB2</b>	350	2.3	11144
	300	2.4(*)	68671
		2.5	49419
		2.6	44605
	250	2.8	62573
		2.9	52110
		2.10(*)	83453
	200	2.11	121318
<b>MB3</b>	350	3.1	24563
		3.2	24238
		3.3(*)	15364
	300	3.4	91938
		3.5	80484
		3.6(*)	40128
	250	3.7	172961
		3.8	162924
		3.9(*)	81333
	200	3.10(*)	248997
		3.11(*)	101723
		3.12	99767

(\*)Provetes não considerados para a determinação da lei de fadiga das misturas betuminosas.





→ **Anexo H: Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente.**Quadro H.1 – Resultados do ensaio de pista da mistura **MB1**.

<b>Ciclo de carga</b>	<b>RD<sub>AIR</sub> (mm)</b>
0	0
250	0,73
500	0,86
750	0,91
1000	0,98
1250	0,99
1500	1,03
1750	1,03
2000	1,06
2250	1,07
2500	1,09
2750	1,10
3000	1,10
3250	1,12
3500	1,11
3750	1,14
4000	1,14
4250	1,13
4500	1,19
4750	1,16
<b>5000</b>	<b>1,18</b>
5250	1,19
5500	1,19
5750	1,19
6000	1,25
6250	1,23
6500	1,21
6750	1,21
7000	1,27
7250	1,25
7500	1,24
7750	1,30
8000	1,30
8250	1,29
8500	1,30
8750	1,31
9000	1,38
9250	1,36
9500	1,41
9750	1,44
<b>10000</b>	<b>1,48</b>

Quadro H.2 – Resultados do ensaio de pista da mistura **MB2**.

<b>Ciclo de carga</b>	<b>RD<sub>AIR</sub> (mm)</b>
0	0,02
250	0,34
500	0,46
750	0,50
1000	0,53
1250	0,56
1500	0,58
1750	0,59
2000	0,61
2250	0,62
2500	0,63
2750	0,64
3000	0,65
3250	0,66
3500	0,67
3750	0,67
4000	0,68
4250	0,68
4500	0,69
4750	0,70
<b>5000</b>	<b>0,70</b>
5250	0,70
5500	0,70
5750	0,72
6000	0,71
6250	0,72
6500	0,72
6750	0,73
7000	0,73
7250	0,73
7500	0,74
7750	0,74
8000	0,73
8250	0,74
8500	0,74
8750	0,75
9000	0,74
9250	0,75
9500	0,75
9750	0,75
<b>10000</b>	<b>0,76</b>

Quadro H.3 – Resultados do ensaio de pista da mistura **MB3**.

<b>Ciclo de carga</b>	<b>RD<sub>AIR</sub> (mm)</b>
0	0,07
250	0,85
500	1,03
750	1,14
1000	1,23
1250	1,29
1500	1,37
1750	1,42
2000	1,46
2250	1,49
2500	1,53
2750	1,56
3000	1,57
3250	1,59
3500	1,64
3750	1,65
4000	1,69
4250	1,72
4500	1,73
4750	1,74
<b>5000</b>	<b>1,77</b>
5250	1,78
5500	1,81
5750	1,83
6000	1,84
6250	1,84
6500	1,87
6750	1,89
7000	1,88
7250	1,91
7500	1,94
7750	1,93
8000	1,96
8250	1,97
8500	1,97
8750	1,97
9000	1,98
9250	2,02
9500	2,02
9750	2,03
<b>10000</b>	<b>2,05</b>

Quadro H.4 – Resultados do ensaio de pista da placa extra da mistura **MB2**.

<b>Ciclo de carga</b>	<b>RD<sub>AIR</sub> (mm)</b>
0	0,05
250	0,65
500	0,84
750	0,95
1000	1,08
1250	1,15
1500	1,23
1750	1,33
2000	1,38
2250	1,37
2500	1,43
2750	1,47
3000	1,47
3250	1,52
3500	1,51
3750	1,55
4000	1,55
4250	1,60
4500	1,58
4750	1,62
<b>5000</b>	<b>1,63</b>
5250	1,63
5500	1,68
5750	1,71
6000	1,71
6250	1,75
6500	1,78
6750	1,80
7000	1,79
7250	1,82
7500	1,82
7750	1,83
8000	1,84
8250	1,83
8500	1,86
8750	1,87
9000	1,86
9250	1,90
9500	1,89
9750	1,91
<b>10000</b>	<b>1,93</b>

